



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**MAKRO A MIKROSTRUKTURA SVAROVÝCH SPOJŮ
TITANOVÉ SLITINY TIAL6V4 ZHOTOVENÝCH
ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM**

MACRO AND MICROSTRUCTURE OF WELD JOINTS MADE OF TITANIUM ALLOY TIAL6V4 BY ELECTRON BEAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Prachař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Václav Prachař**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Makro a mikrostruktura svarových spojů titanové slitiny TiAl6V4 zhotovených elektronovým paprskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hodnocení makro, mikrostruktury a profilů tvrdosti svarových spojů plechů z titanové slitiny TiAl6V4 zhotovených elektronovým paprskem (dále EB) pro různé parametry jeho nastavení. Nedílnou součástí práce bude seznámení se s vlastnostmi titanových slitin a s problematikou svařování elektronovým paprskem (EBW).

Cíle bakalářské práce:

Vyhodnotit makro a mikrostrukturu, včetně profilů tvrdosti svarů plechů ze slitiny TiAl6V4 o tloušťce 20 mm zhotovených EBW pro různé parametry nastavení EB, konkrétně urychlovacího napětí, fokusace a oscilace.

Svarové spoje budou vytvořeny v laboratoři ÚMVI, hodnocení makro a mikrostruktury (světelná mikroskopie, REM) a profily tvrdosti bude provádět student samostatně, včetně přípravy preparátů.

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, M. J. Titanium: A Technical Guide. 2nd edition. Ohio: ASM International, 2007. ISBN 978-0-87170-686-7.

HRIVŇÁK, I. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Bratislava: STU, 2009. ISBN 978-80-227-3167-6.

JOSHI, V. A. TITANIUM ALLOYS: An Atlas of Structures and Fractures Features. London: CRC Press, 2006, ISBN 0-8493-5010-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vyhodnocení makro a mikrostruktury svarových spojů slitiny Ti6Al4V, zhotovených svařováním elektronovým svazkem pro různé nastavení procesních parametrů elektronového svazku, a vyhodnocení vlivů těchto parametrů na výslednou strukturu svarových spojů. Teoretická část této práce se zabývá titanem a jeho slitinami, konkrétní titanovou slitinou Ti6Al4V a technologií svařování elektronovým svazkem. V experimentální části je vyhodnoceno 11 svarových spojů, jejich makro a mikrostruktura a profily tvrdosti svarových spojů.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to evaluate macro and microstructures of weld joints made of titanium alloy Ti6Al4V by electron beam welding with different processing parameters of electron beam and evaluate the impact of this processing parameters to the structure of resultant weld joints. The theoretical part deals with titanium and its alloys, the titanium alloy Ti6Al4V and electron beam welding technology. In the experimental part, 11 weld joints are evaluated, their macro and microstructures and hardness profiles.

KLÍČOVÁ SLOVA

titan, titanové slitiny, Ti6Al4V, svařování elektronovým svazkem, makrostruktura, mikrostruktura

KEY WORDS

titanium, titanium alloys, Ti6Al4V, electron beam welding, macrostructure, microstructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRACHAŘ, V. *Makro a mikrostruktura svarových spojů titanové slitiny TiAl6V4 zhotovených elektronovým paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Makro a mikrostruktura svarových spojů titanové slitiny TiAl6V4 zhotovených elektronovým paprskem“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne

.....

Václav Prachař

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rudolfu Foretovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady, které mi poskytoval v průběhu zpracovávání bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Havlíkovi za odbornou pomoc při provádění experimentálních prací a v neposlední řadě také svojí rodině, která mě v průběhu studia podporovala.

Obsah

1. Úvod.....	9
Teoretická část.....	10
2. Titan a jeho slitiny.....	10
2.1 Čistý titan.....	10
2.1.1 Výskyt	11
2.1.2 Výroba.....	12
2.2 Slitiny titanu	14
2.2.1 Slitiny α a pseudo α	15
2.2.2 Slitiny $\alpha+\beta$	15
2.2.3 Slitiny β a pseudo β	16
2.2.4 Slitina Ti-6Al-4V (Ti64)	16
2.3 Svařitelnost titanových slitin	17
3. Svařování elektronovým svazkem (EBW).....	20
3.1 Zařízení pro EBW.....	21
3.2 Vliv procesních parametrů.....	23
Experimentální část.....	25
4. Experimentální materiál	25
5. Experimentální metody	25
6. Vyhodnocení vzorků	27
6.1 Vliv urychlovacího napětí U_A	27
6.2 Vliv rychlosti svařování v	34
6.3 Vliv fokusace	38
6.4 Rozbor mikrostruktury	41
6.5 Profil mikrotvrdosti	42
7. Rozbor výsledků.....	45
8. Závěr.....	47
9. Seznam literatury.....	48
10. Seznam použitých zkratk a symbolů	50
11. Seznam obrázků	51
12. Seznam tabulek	53

1. Úvod

Titan jako čistý kov se podařilo poprvé získat až na začátku 20. století, ale titan si velmi rychle našel uplatnění v mnoha odvětvích díky své široké škále vlastností. Titan má výbornou korozní odolnost, vysokou pevnou a zároveň nízkou hmotnost. Díky své alotropii titan vytváří velké množství slitin, které se vyznačují vysokou měrnou pevností do teplot 600 °C, dobrou odolností proti křehkému porušení za nízkých teplot, vysokou odolností proti únavovému namáhání a lomovou houževnatostí. Titanové slitiny našli uplatnění nejen v leteckém a raketovém průmyslu, ale také například v cyklistice a dalších sportech. Ve velké míře se titan využívá i ve zdravotnictví z důvodu své biokompatibility na chirurgické nástroje nebo zubní a kloubní implantáty. Hlavní nevýhodou titanu je jeho vysoká cena z důvodu nákladné výroby a zpracovávání titanu a jeho slitin způsobené jeho vysokou reaktivitou s atmosférickými plyny za vysokých teplot.

Kvůli vysoké reaktivitě titanu je problematické i jeho svařování. Zde se nabízí využít svařování elektronovým svazkem (EBW), které probíhá ve vakuu, jež nám zaručuje dobrou ochranu svařovaného materiálu před působením atmosférických plynů. Vzhledem k tomu, že EBW je poměrně nová technologie a zatím není tak popsána a využívána jako konvenční metoda svařování, předchází svařování nového materiálu, popř. změně svařované tloušťky náročný proces optimalizace procesních parametrů svařování.

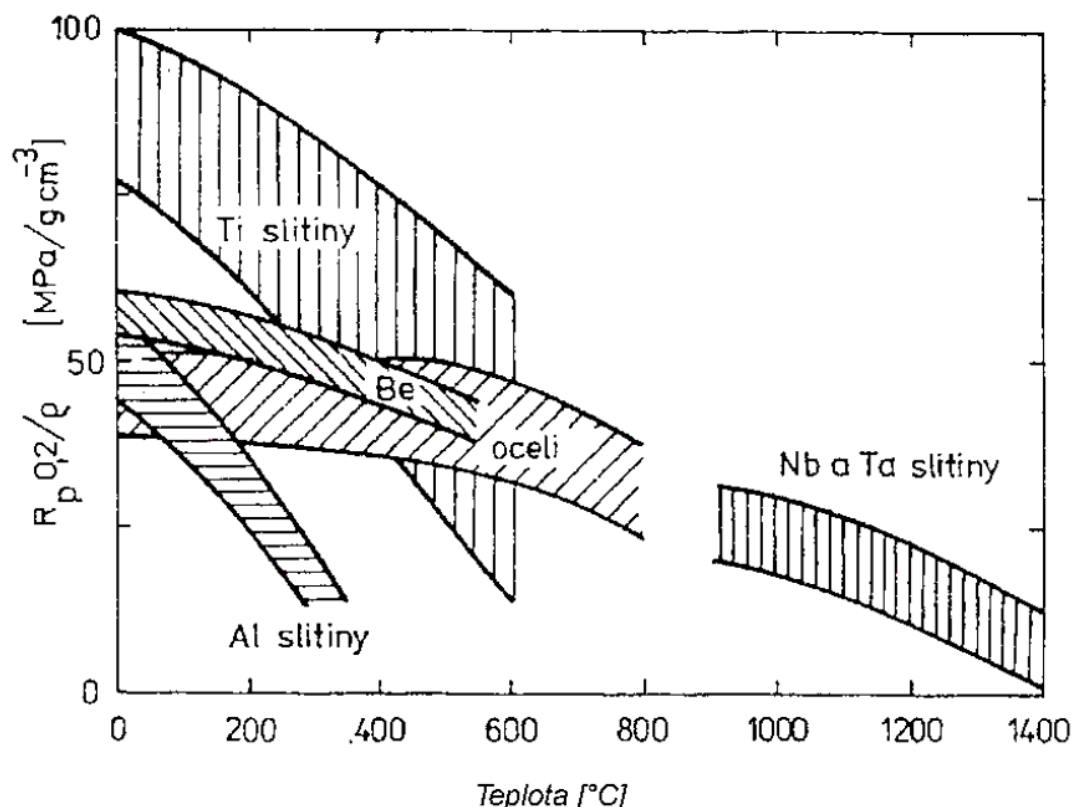
Ústav materiálových věd a inženýrství se podílí na řešení projektu FV10385 *Pokročilé technologie výroby oběžných kol*, který je realizován v rámci programu MPO TRIO. Dílčím cílem tohoto řešení byla optimalizace tvaru homogenního svaru titanové slitiny TiAl6V4 (dále Ti64), který se prováděl elektronovým svazkem (EB). Optimalizací se rozuměla zejména minimalizace protečení kořene svaru a převýšení jeho hlavy, neboť oběžná kola není možné následně opracovávat. Mezi základní procesní parametry patří urychlovací napětí, proud svazku, rychlost pohybu součásti a rozostření svazku, přičemž se sledoval vliv uvedených parametrů především na makrostrukturu svarového spoje a mikrotvrdost poskytnutých laboratorních svarových spojů.

Teoretická část

2. Titan a jeho slitiny

2.1 Čistý titan

Titan se řadí spolu s tantalem, niobem, zirkoniem a dalšími kovy do skupiny těžkovitých kovů, které se vyznačují především vysokou pevností, tvrdostí, dobrou korozní odolností a vysokou teplotou tání. Titan je polymorfní, paramagnetický kov stříbrné barvy s nízkou měrnou hmotností $4\,505\text{ kg/m}^3$ a vysokou měrnou pevností i za vyšších teplot (viz obr. 1). Dobrá je také jeho korozní odolnost nejen na vzduchu, kde se pasivuje tenkou vrstvou oxidu titaničitého TiO_2 , ale také v mořské vodě nebo v prostředí chlóru a jeho sloučenin (oplášťování lodí, chemický průmysl, výroba umělých hmot). Titan se z důvodu své zdravotní nezávadnosti také používá ve zdravotnictví na chirurgické nástroje, kloubní či zubní implantáty atd. Nízká hustota a vysoká pevnost titanu se využívá především v letecké a raketové technice. Nevýhodou titanu je především vysoká cena, kvůli nákladné výrobě a omezeným možnostem zpracovávání, způsobeným zejména jeho vysokou reaktivitou za vysokých teplot. Titan za vysokých teplot reaguje s kyslíkem, dusíkem, vodíkem a uhlíkem, což se vyznačuje zvýšením pevnosti a výrazným zkřehnutím. Aby se zabránilo těmto reakcím, tak se musí titan zpracovávat v ochranných atmosférách nebo ve vakuu. Přehled základních vlastností titanu je znázorněn v tabulce 1. [1-3]



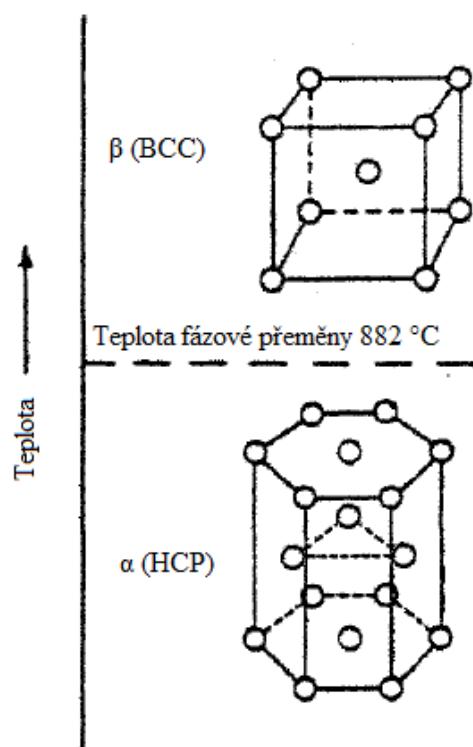
Obrázek 1: Vliv teploty na měrnou mez kluzu různých slitin [2]

Tabulka 1: Přehled vlastností titanu [2, 3]

Veličina	Symbol	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tahu	R_m	MPa	1250
Youngův modul pružnosti	E	GPa	115
Tažnost	A	%	60
Hustota	ρ	kg/m ³	4500
Teplota tání	T_t	°C	1668
Teplota varu	T_v	°C	3287

Titan je alotropický kov, který má dvě modifikace:

- Ti α s šesterečnou těsně uspořádanou mřížkou (HCP), která je stabilní do teploty 882 °C,
- Ti β s kubickou prostorově středěnou mřížkou (BCC), stabilní v rozmezí teplot 882 až 1 668 °C (viz obr. 2). [2]



Obrázek 2: Krystalografická struktura titanu [7]

2.1.1 Výskyt

Titan je 10. nejrozšířenějším prvkem a 9. nejrozšířenějším kovem v zemské kůře s obsahem 0,6 hm. %. Ryzí titan se vyskytuje jen velmi vzácně. Ve formě minerálů je v půdě zastoupen téměř všude. Největší obsah titanu mají minerály osbornit TiN s obsahem 77,37 hm. % Ti a hongquilit TiO s 74,95 hm. % Ti. Nejvýznamnějšími rudami titanu jsou však ilmenit $FeTiO_3$ (obr. 3 vlevo) a rutil TiO_2 (obr. 3 vpravo), dalšími významnými rudami jsou perovskit $CaTiO_3$ a titanit $CaTiSiO_5$. Největší zásoby dvou nejvýznamnějších rud mají Čína, Austrálie a Indie.

V Evropě má největší zásoby těchto rud Ukrajina. Na území ČR nebyla doposud nalezena žádná ložiska titanových rud. [1, 3]



Obrázek 3: Titanové rudy ilmenit a rutil [4, 5]

2.1.2 Výroba

Titan se kvůli své vysoké reaktivitě za vysokých teplot nedá vyrábět běžným hutním procesem jako většina kovů. První metoda na výrobu titanu, kterou vymyslel Matthew Hunter, spočívá v reakci chloridu titaničitého se sodíkem. Tato metoda byla využívána mnoho let, dokud v roce 1932 nevymyslel Dr. William Justin Kroll novou, v současné době nejvyužívanější, efektivnější metodu na výrobu titanu. V současné době lze titan vyrábět více způsoby, avšak většina titanu se vyrábí pomocí Krollova procesu, který je schematicky znázorněn na obr. 5. [1, 3]

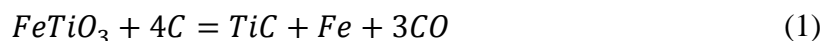
2.1.2.1 Krollův proces

Průmyslová výroba titanu Krollovou metodou se skládá ze čtyř fází.

1. Příprava materiálu pro chloraci.
2. Výroba chloridu titaničitého.
3. Redukce titanové houby.
4. Přetavování Ti houby na kujný titan.

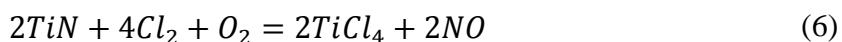
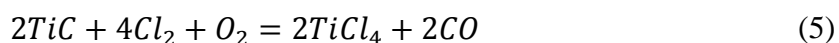
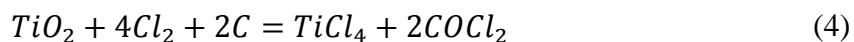
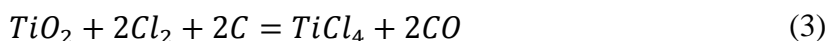
Příprava materiálu pro chloraci

V případě zpracovávání rutilu TiO_2 se pouze smíchá s uhlím v poměru 3:1 a lisuje do briket. Když se zpracovává ilmenit FeTiO_3 , je nutné nejdříve ilmenit selektivně redukovat v obloukové peci na surové železo za vzniku karbidu titanu, který přechází do strusky. Jestliže se při redukci ilmenitu přivádí vzduch popř. amoniak, tvoří se nitrid titanu. [3, 6]



Výroba chloridu titaničitého

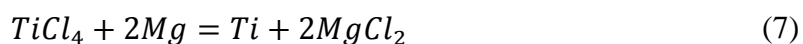
Vlastní chlorace probíhá v odporově vytápěných pecích za teplot 800-1200 °C. Průběh chlorace je popsán následujícími rovnicemi:



Chlorid titaničitý vzniká ve formě par, které následně kondenzují v nažloutlou kapalinu. Před samotnou redukcí se chlorid titaničitý čistí a opět destiluje. [3, 6]

Redukce titanové houby

Vlastní redukce probíhá v ochranné atmosféře argonu nebo hélia při teplotách 850-900 °C. Redukce chloridu titaničitého se provádí hořčíkem podle následující rovnice:



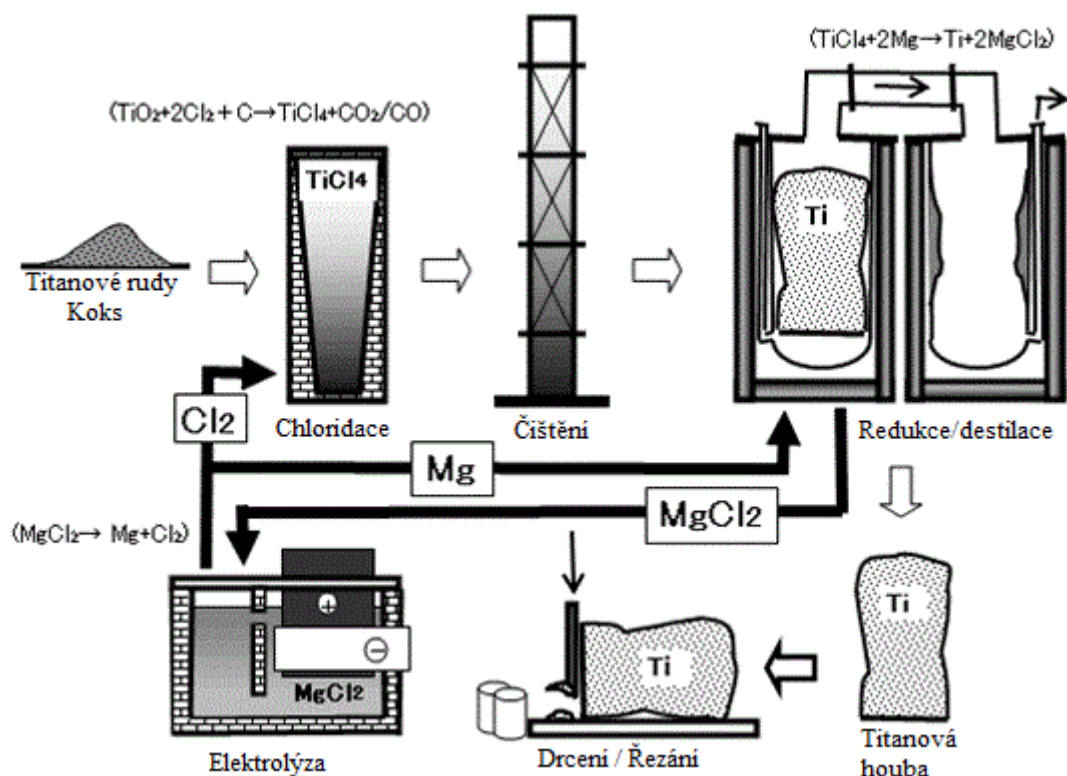
Produktem redukce je titanová houba (obr. 4), která se usazuje na stěnách nádoby. Chlorid hořečnatý, který vzniká při reakci, se společně s přebytečným hořčíkem odstraní proplachováním kyselinou chlorovodíkovou, nebo vakuovou destilací. [3, 6]



Obrázek 4: Titanová houba [22]

Přetavování Ti houby na kujný titan

Vzniklá titanová houba se slisuje do tvaru elektrody, a následně se přetaví na kujný titan v obloukové peci pod ochrannou atmosférou argonu, popř. ve vakuu. [6]



Obrázek 5: Krollův proces [23]

2.2 Slitiny titanu

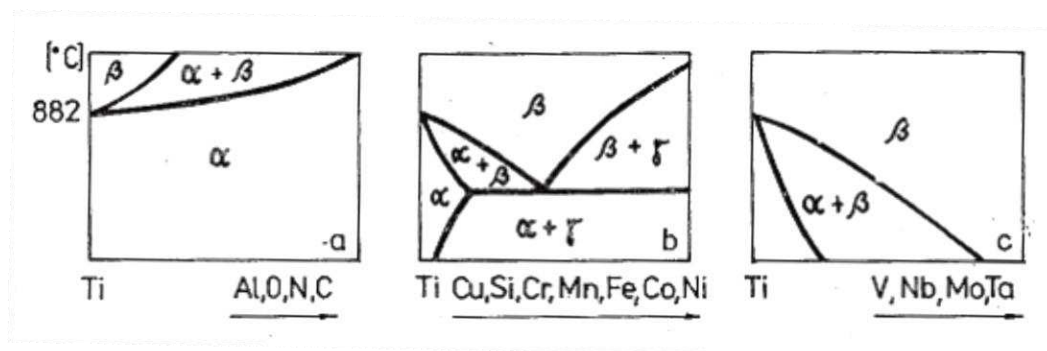
Titan se v praxi většinou nepoužívá jako čistý kov, ale používají se jeho slitiny, protože přidáváním různých prvků můžeme zlepšovat jeho vlastnosti a docílit tím kombinací vlastností potřebných pro danou aplikaci. Stejně jako čistý titan mají i jeho slitiny dvě alotropické modifikace. Legující prvky v závislosti na tom, kterou modifikaci stabilizují, dělíme na α a β stabilizátory (obr. 6). Prvky cín a zirkon nemají výrazný vliv na teplotu fázové přeměny, ale zpevňují tuhý roztok. [1, 2]

α stabilizátory

Do této skupiny stabilizátorů patří prvky - Al, O, N a C. Tyto prvky zvyšují teplotu fázové přeměny, a tím stabilizují tuhý roztok α . Kyslík, uhlík a dusík jsou brány jako nežádoucí nečistoty, neboť způsobují výrazné zkřehnutí slitiny, a proto je snaha udržovat jejich obsah na minimálních hodnotách. Jediný prvek, který se reálně využívá jako α stabilizátor je tedy hliník, jenž je obsažen téměř ve všech vyráběných slitinách titanu. [2, 7]

β stabilizátory

Prvky stabilizující fázi β (V, Mo, Nb, Ta) snižují teplotu fázové přeměny a při dostatečném obsahu těchto prvků je fáze β stabilní i za normálních teplot. V případě příměsových prvků Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co a Ni dochází při nízké teplotě k eutektoidnímu rozpadu tuhého roztoku β . [2, 7]



Obrázek 6: Vliv přísadových prvků na teplotu fázové přeměny [2]

Slitiny titanu se dělí podle fázového složení na tyto typy:

- slitiny α ;
- slitiny pseudo α ;
- slitiny $\alpha+\beta$;
- slitiny β ;
- slitiny pseudo β .

2.2.1 Slitiny α a pseudo α

Slitiny α jsou slitiny s poměrně velkým obsahem α stabilizátorů a relativně malým nebo žádným obsahem β stabilizátorů. Legují se především hliníkem, který stabilizuje fázi α , ale také cínem nebo zirkoniem, což zvyšuje pevnost a neovlivňuje teplotu fázové přeměny. Tyto slitiny se vyznačují výrazně vyšší pevností až do teplot 600 °C, než vykazují slitiny $\alpha+\beta$ nebo slitiny β . Slitiny α mají také dobrou odolnost proti křehkému porušení za nízkých teplot. Velmi často jsou tvářené za studena s následným rekrystalizačním žháním a mají také dobrou svařitelnost.

Jednou z velmi používaných α slitin je slitina Ti-5Al-2,5Sn, která má velmi dobré vlastnosti i za nízkých teplot. Ze skupiny pseudo α to je například Ti-8Al-1Mo-1V, která obsahuje i malé množství β stabilizátorů. Slitiny pseudo α mají oproti slitinám α vyšší pevnost a lepší tvárnost za studena v důsledku přítomnosti fáze β , která bývá v rozmezí 2-6 hm. %. [1, 2, 7, 8]

2.2.2 Slitiny $\alpha+\beta$

Slitiny $\alpha+\beta$ obsahují oba typy stabilizátorů. Ze skupiny α stabilizátorů to je hliník, který obsahují téměř všechny slitiny, a ze skupiny β stabilizátorů to jsou nejčastěji vanad nebo molybden. Slitiny $\alpha+\beta$ jsou nejčastěji používané titanové slitiny a to i kvůli široké škále vlastností, závislých na mikrostruktuře. Tyto slitiny se vyznačují především svou vysokou pevností. Zároveň mají vysokou odolnost proti únavovému namáhání a jsou dobře tvárny za tepla, kdežto za studena je jejich tvárnost omezená. Jejich svařitelnost a odolnost vůči creepu je horší než u slitin α a pseudo α . Slitiny $\alpha+\beta$ lze tepelným zpracováním vytvrzovat a tím výrazně zlepšovat jejich mechanické vlastnosti do hloubky 25 mm. Nevýhodou vytvrzených slitin je jejich snížená lomová houževnatost.

Nejpoužívanější titanovou slitinou z této skupiny je slitina Ti64, která dosahuje hodnot pevnosti v tahu až 1 125 MPa. [1, 2, 7-10]

2.2.3 Slitiny β a pseudo β

Slitiny β a pseudo β obsahují nižší množství α stabilizátorů a výrazně vyšší množství β stabilizátorů, než dvoufázové slitiny $\alpha+\beta$. Hlavní nevýhodou těchto slitin je, že z důvodu vysokého obsahu β stabilizátorů mají větší hmotnost než ostatní titanové slitiny. Zároveň je kvůli vysokému obsahu legur můžeme dobře tepelně zpracovávat a vhodnou kombinací s tvářením lze dosáhnout pevnosti v tahu až 1 500 MPa při tažnosti 3-5 %. Lomová houževnatost těchto slitin je lepší než u slitin $\alpha+\beta$, ale dochází u nich k rychlejšímu růstu únavových trhlin. Jejich výhodou je i dobrá tvárnost za studena, která je dána BCC mřížkou, a možnost svařování. Tyto slitiny se používají zejména na konstrukční díly v leteckém a raketovém průmyslu na výrobky, které vyžadují vyšší stupeň tváření za studena. [1, 2, 7-9]

2.2.4 Slitina Ti-6Al-4V (Ti64)

Slitina Ti64 je nejpoužívanější slitinou titanu, přičemž představuje zhruba 50 % hmotnosti celkové výroby všech titanových slitin. Má dvoufázovou strukturu $\alpha+\beta$ a obsahuje 6 % hliníku a 4 % vanadu. Využívá se především v letecké a raketové technice, na tlakové nádoby, disky a lopatky kompresorů a turbín, chirurgické nástroje a implantáty. Kombinuje skvělou pevnost a houževnatost spolu s výbornou korozivzdorností. [1]

Slitina Ti64 má velice úzký interval tuhnutí (asi 5 °C), její krystalizace se tedy podobá tuhnutí čistého kovu. Tato slitina vykazuje mj. malou citlivost na trhliny za tepla. β zrna natavené slitiny tuhnou epitaxiálně ve směru $\langle 100 \rangle$ a ve směru maximálního odvodu tepla. Hrubá β zrna ve WM (Weld Metal) a HAZ (Heat Affected Zone) jsou způsobena přehřátím taveniny a i malým počtem vhodných iniciačních míst pro epitaxiální růst.

Vysoká rychlost ochlazování svarového spoje při EBW podle Sakariho [11] vede k martenzitické přeměně β fáze jak WM tak i části HAZ. Ve slitině Ti64 mohou vzniknout dva typy martenzitu, a to:

- α' hexagonální martenzit (lath or massive martensite), který je tvořen laťkami o tloušťce asi 0,1 μm , které jsou rovnoběžné a tvoří útvary nepravidelného tvaru (pakety);
- α'' orthorombický (acikulární) tvořený jednotlivými laťkami s větší dezorientací, které rostou individuálně.

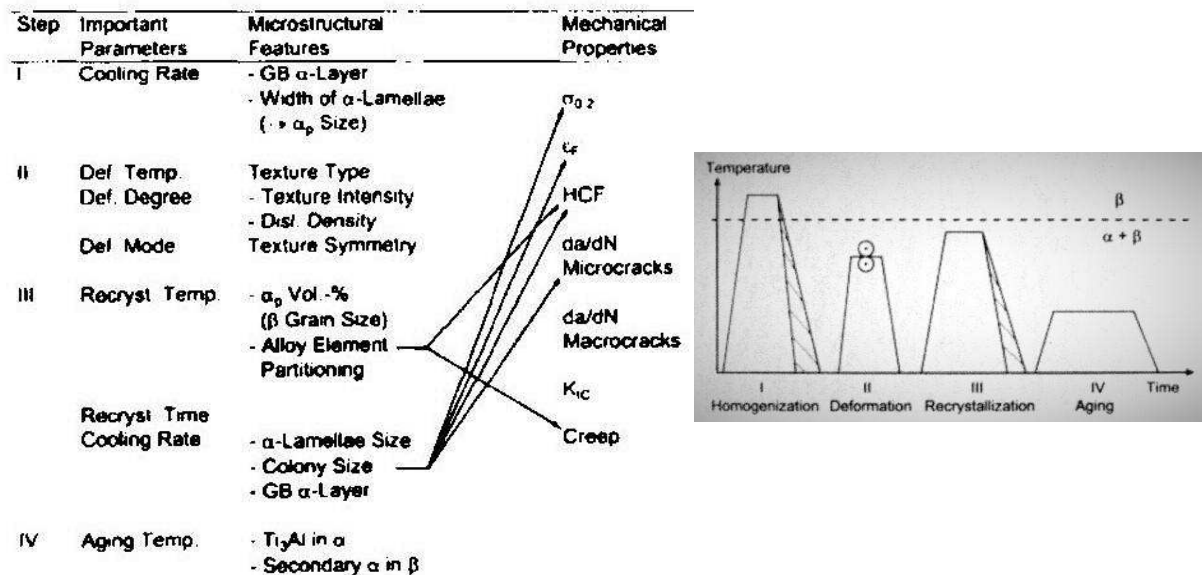
Oba typy martenzitu jsou velice jemné a těžko rozlišitelné světelnou mikroskopií.

Pokud je rychlost ochlazování β fáze menší, než rychlost kritická (410°C/s), pak např. podle Stráského [12] vznikají tyto typické struktury:

- **lamelární struktura**, lamely α fáze vznikají uvnitř β fáze, typická tloušťka lamel 0,5-5 μm a délka až stovky μm . Fáze α nejdříve vytváří souvislou vrstvu po hranicích zrn fáze β , poté fáze α roste dovnitř zrn β fáze ve formě rovnoběžných desek (lamel) a vytváří kolonie – lamelární strukturu. Při větších rychlostech ochlazování mohou desky fáze α nukleovat na hranicích primárních desek α , což vede ke vzniku tzv. košíčkové morfologie.
- **duplexní $\alpha+\beta$ struktura**, tvořená „zrny“ s lamelární morfologií $\alpha+\beta$ a rovnoosými zrny α fáze (homogenizace v oblasti β a následné žíhání v oblasti $\alpha+\beta$).

- **globulární $\alpha+\beta$ mikrostruktura**, vzniká pomalou rychlostí ochlazování po rekrystalizaci a nízkou teplotou žhání. Tato struktura je tvořena rovnoosými zrný primární α fáze (α_P) a β fáze se vyskytuje po hranicích α_P .

Typ mikrostruktury a její kvantitativní charakteristiky výrazně ovlivňuje celý teplotně-deformační cyklus. Vliv procesních parametrů na mikrostrukturu a následně na mechanické vlastnosti je schematicky znázorněn na obr. 7 pro případ duplexní $\alpha+\beta$ struktury. [13]



Obrázek 7: Důležité procesní parametry, výsledná mikrostruktura a její vliv na mechanické vlastnosti pro dvoufázovou mikrostrukturu [13]

Stráský [12] uvádí toto porovnání struktur slitiny Ti64 z hlediska základních mechanických vlastností:

- Lamelární struktura. Zjemnění lamel α fáze vede ke zvýšení pevnosti v tahu, naopak jejich zhrubnutí má za následek menší rychlost šíření únavových trhlin.
- Duplexní $\alpha+\beta$ struktura. Velikost lamel a obsah α_P ovlivňují pevnost. Optimální obsah α_P činí 15-20 %. Slitiny s duplexní strukturou mají vyšší pevnost než slitiny se strukturou pouze lamelární.
- Globulární $\alpha+\beta$ mikrostruktura. Velikost zrn jednotlivých fází ovlivňuje pevnost, jejich dosažitelná minimální velikost činí 2 μm . Tento strukturní stav má nejvyšší pevnostní charakteristiky.

2.3 Svařitelnost titanových slitin

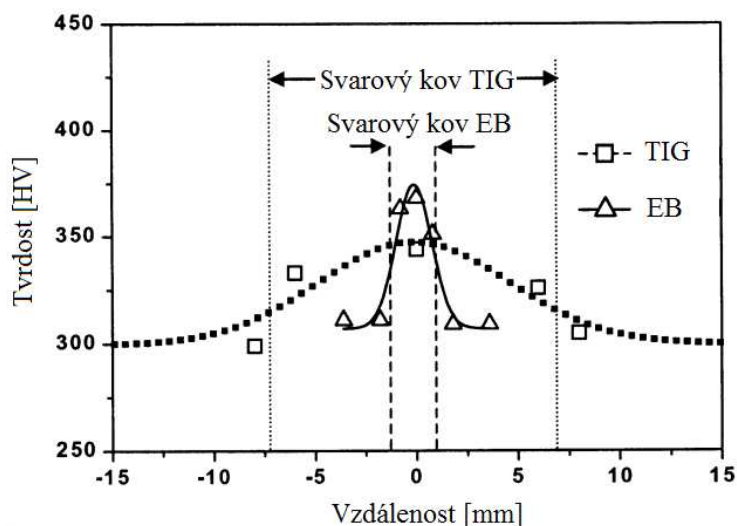
Nejlepší svařitelnost má komerčně čistý titan a slitiny α . Slitiny α se doporučují svařovat ve vyžháném stavu, aby nedocházelo k poklesu mechanických vlastností v HAZ. U slitin $\alpha+\beta$ a β je svařitelnost obtížnější. U slitin $\alpha+\beta$ je to zejména z důvodu probíhajících fázových transformací způsobených teplotním cyklem. Při svařování těchto slitin se výrazně mění mechanické vlastnosti WM a HAZ oproti základnímu materiálu a u vytvrzených slitin s vyšší pevností hrozí nebezpečí praskání. U slitin α a $\alpha+\beta$ se vlivem zvýšené teploty v HAZ zvyšuje podíl fáze β a při následném chladnutí v závislosti na chemickém složení slitiny a rychlosti ochlazování mohou probíhat různé fázové přeměny $\beta \rightarrow \alpha$. Po transformaci fáze β na fázi α

můžeme v HAZ pozorovat jehlicovitou, nebo Widmannstättenovu strukturu v případě $\alpha+\beta$ slitin. V HAZ dochází také vlivem teploty k růstu zrn fáze β . Ke strukturním změnám u slitin α a $\alpha+\beta$ nedochází v oblastech, kde teplota nepřesáhla hodnotu 550 °C. U slitin β nedochází v HAZ k žádným fázovým transformacím. Po svařování titanových slitin se doporučuje provést žhání ke snížení pnutí. Titan a jeho slitiny lze svařet pomocí různých metod jako MIG/MAG, TIG, odporové svařování, plazmové svařování nebo pomocí laserového a elektronového svazku. [1, 14-16]

Vzhledem k vysoké reaktivitě titanu za vysokých teplot se musí svařování titanu a jeho slitin provádět v ochranné atmosféře inertního plynu (argon nebo helium) nebo ve vakuu, přičemž tato ochranná atmosféra musí být zachována, dokud teplota materiálu neklesne pod 450 °C. Při špatné ochraně povrchu dojde k reakci svařovaného materiálu s atmosférickými plyny (O, N, H) a dojde k výraznému zkřehnutí materiálu. Tato reakce se projeví i zbarvením povrchu v okolí svaru do modra. Při špatném očištění svarových ploch a přítomnosti vodíku dochází ke vzniku pórů ve svaru. K dosažení kvalitního svarového spoje bez pórů musí být obsah vodíku nižší než 150 – 100 ppm. K dalším nežádoucím změnám vlastností může docházet vlivem segregace legujících prvků při tuhnutí svarového kovu. [7, 14]

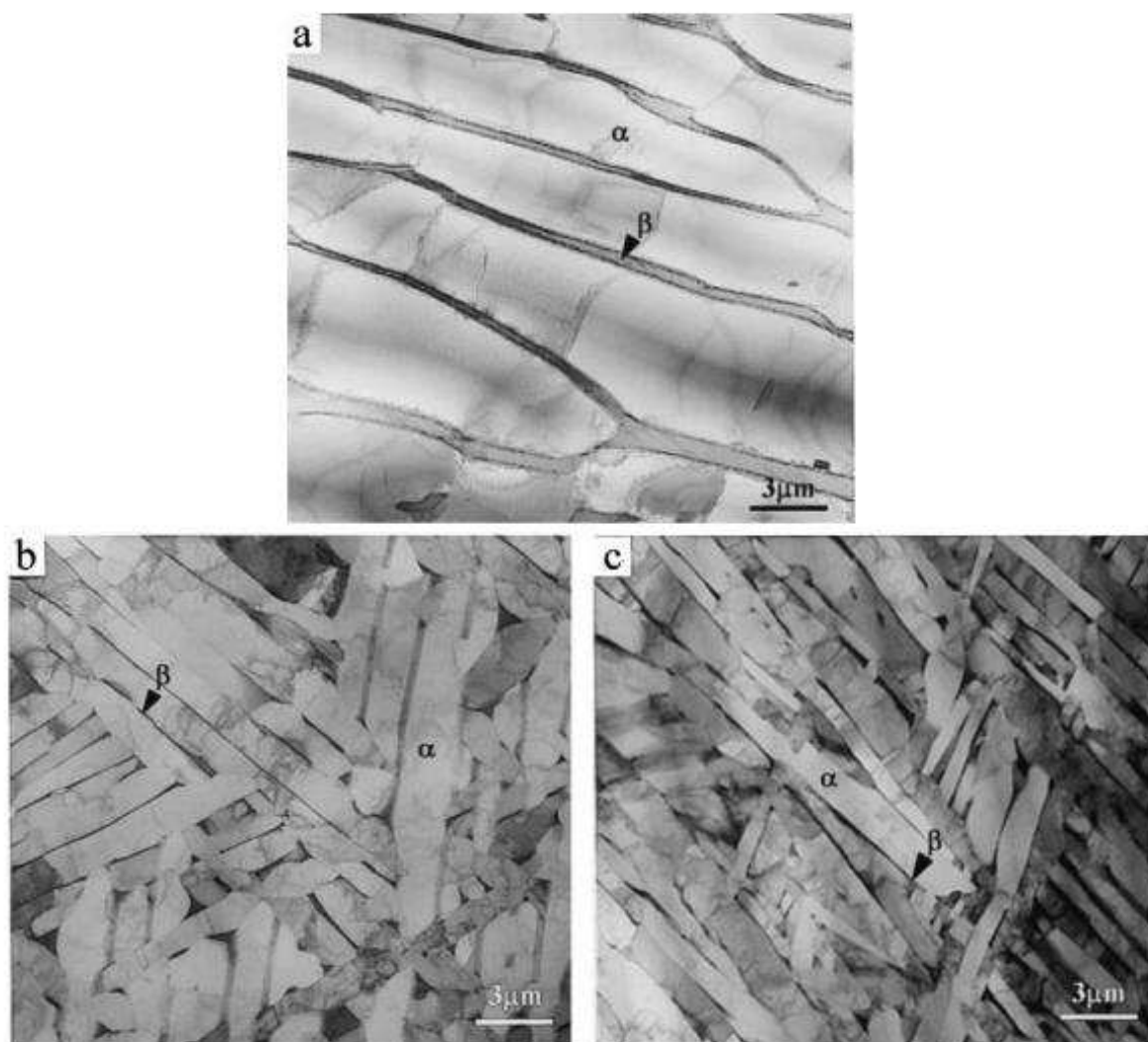
Slitina Ti64 má nejlepší svařitelnost ze skupiny slitin $\alpha+\beta$. Svařitelnost této slitiny je dána tím, že α' martenzit, který vzniká při tuhnutí ve slitině Ti64, není tak tvrdý a křehký jako ve slitinách, které obsahují více β stabilizátorů a dojde pouze k mírnému vytvrzení po ochlazení. Ti64 je také velmi odolná proti vzniku trhlin za tepla, díky nepřítomnosti nízko tavitelného eutektika. [1]

Při svařování dochází ke změně struktury a vlastností, což se projevuje i zvýšením tvrdosti. Tvrdost v HAZ je přibližně stejná jako v základním materiálu, ale ve svarovém kovu směrem ke středu roste. Průběh tvrdosti se liší, podle použité metody svařování. Při porovnání průběhu tvrdosti svarového spoje zhotoveného metodou TIG a EB je u svaru provedeného EB vyšší nárůst tvrdosti, ale celková oblast se zvýšenou tvrdostí je výrazně užší (viz obr. 8). [17]



Obrázek 8: Průběh tvrdosti [17]

Na obrázku 9 jsou snímky mikrostruktury základního materiálu (a), svarového spoje provedeného metodou TIG (b) a svarového spoje zhotoveného EB (c). V základním materiálu je β fáze rozložena mezi lamelami α fáze, které mají tloušťku zhruba $4\ \mu\text{m}$. Ve svarovém spoji zhotoveném metodou TIG jsou lamely fáze α o tloušťce okolo $1\ \mu\text{m}$, tedy výrazně tenčí, než v základním materiálu. α lamely vzniklé po svařování EB jsou ještě tenčí, než po svařování metodou TIG, kvůli rychlejšímu ochlazování. [17] Tato lamelární struktura ve svaru zhotoveného EB je v rozporu s tvrzením Sakariho [11], který uvádí, že ve WM se vyskytuje martenzitická struktura.



Obrázek 9: Mikrostruktura Ti64: a - základní materiál, b - svar zhotovený metodou TIG, c - svar zhotovený EB [17]

3. Svařování elektronovým svazkem (EBW)

EBW je založeno na přeměně kinetické energie urychlených elektronů na energii tepelnou při neelastické interakci s materiálem. Svazek těchto urychlených elektronů je fokusován tak, aby na povrchu materiálu, popř. pod povrchem, měl největší hustotu energie a tím dochází k velmi rychlému natavování materiálu. Elektrony mohou být urychlovány díky svému elektrickému náboji. Jejich hlavní nevýhodou je velmi malá klidová hmotnost m_e ($9,1 \cdot 10^{-28}$ g), která je ale kompenzována vysokou rychlostí elektronů.

Aby bylo možné uvolnit elektron z krystalografické mřížky materiálu je zapotřebí mu dodat dostatečné množství aktivační energie k překonání potenciálové bariéry. Nejjednodušší metodou je termoemise, tedy ohřev materiálu na vysokou teplotu, při níž se některé kovy stávají termoemisními zdroji elektronů. K samotnému urychlení elektronů dochází v důsledku Coulombových sil působením elektrického pole, čímž dodáváme elektronům potřebnou kinetickou energii. Výsledná rychlost urychlených elektronů je dána rovnicí:

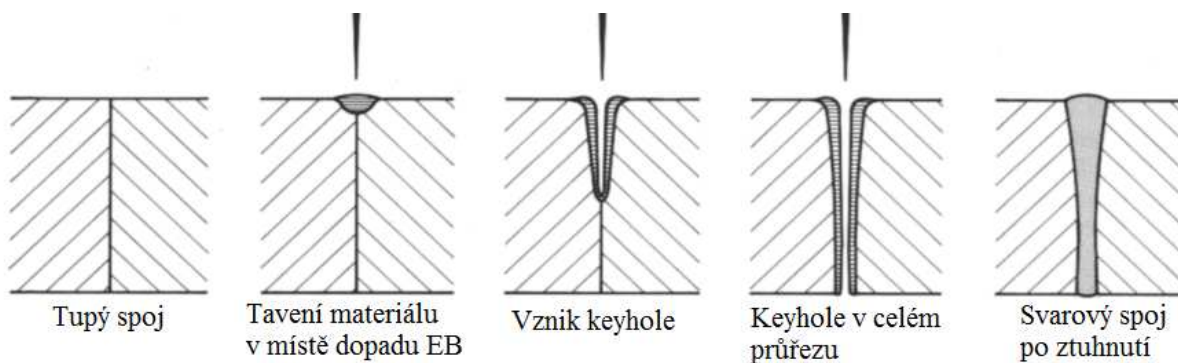
$$v_e = \sqrt{2 \frac{|U_A q_e|}{m_e}} \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (8)$$

kde U_A – urychlovací napětí [kV],
 q_e – náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C),
 m_e – klidová hmotnost elektronu ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).

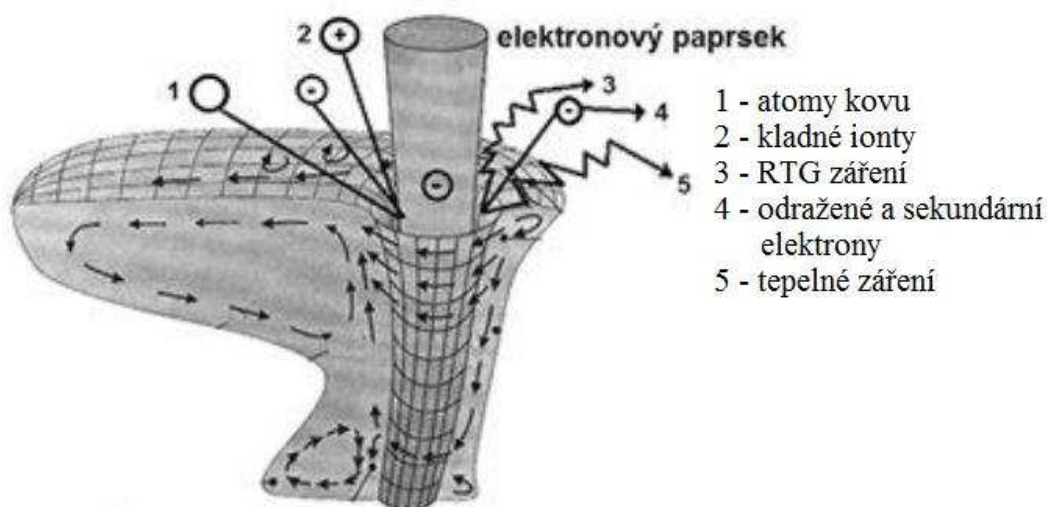
Pokud se urychlené elektrony nachází v magnetickém poli, tak na ně působí Lorentzovy síly. Tyto síly na elektrony působí v kolmém směru na směr dráhy elektronu a tím umožňují fokusovat svazek elektronů bez ovlivňování jejich rychlosti.

Při dopadu na povrch materiálu je část elektronů odražena a zbytek penetruje pod povrch. Hloubka penetrace se liší podle druhu materiálu, ale bývá řádově v desítkách až stovkách mikrometrů (tab. 2). Při interakci s materiálem je většina energie elektronů předána materiálu ve formě tepla, ale dochází také k vyzářování RTG záření, které je potřeba odstínit.

Samotný průběh svařování může probíhat dvěma způsoby. První způsob využívá tzv. keyhole. Při tomto režimu dosahuje dopadající EB na povrch velké hustoty energie více než $10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, což způsobuje v podstatě okamžité ohřátí materiálu na teplotu tání. Velmi rychlým ohřevem materiálu, dochází k tavení a částečnému odpařování materiálu a vzniku kapiláry, které se postupně prohlubuje. Jádrem této kapiláry je tvořeno parami kovu a na stěnách této kapiláry je roztavený kov. Vlivem velmi vysoké teploty páry expandují a tím udržují roztavený kov na stěnách kapiláry a zaručují její stabilitu v celém průřezu. Tato kapilára se označuje jako keyhole a její vznik je znázorněn na obr. 9. Samotný svar vzniká poté, co se stabilní keyhole pohybuje materiálem. Při pohybu keyhole ji roztavený kov obtéká v opačném směru pohybu keyhole (obr. 10). Materiál se před keyhole natavuje a za ní tuhne, čímž vzniká vlastní svar. Touto metodou lze vytvářet velmi hluboké a zároveň úzké svary, jejichž poměr hloubky k šířce bývá větší než 10:1. Druhá metoda probíhá pomocí vedení tepla. EB dopadá na větší plochu a tím dochází k většímu odvodu tepla do materiálu a nedochází k odpařování materiálu. Materiál se vlivem vedení tepla v oblasti spoje nataví a vzniká svar. Svary vzniklé touto metodou bývají širší a mělké. Tato metoda se hodí především pro velmi tenké materiály. [14, 18-20]



Obrázek 10: Vznik keyhole [18]



Obrázek 11: Interakce EB s kovem a proudění taveniny při průchodu keyhole materiálem [21]

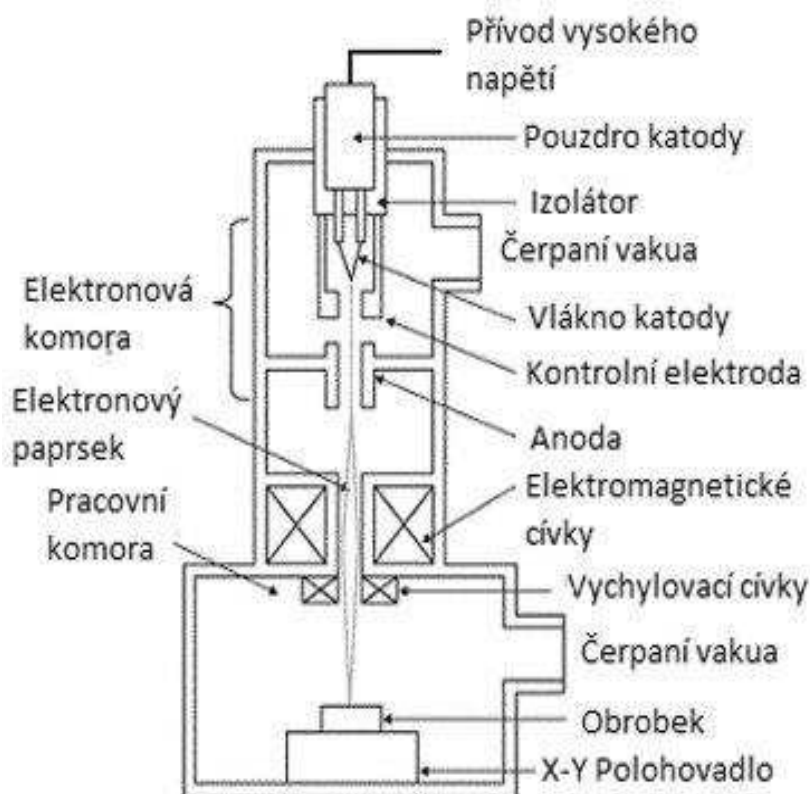
3.1 Zařízení pro EBW

S výjimkou některých speciálních zařízení, lze podle Schultze [18] obecně rozdělit zařízení pro EBW do těchto třech skupin:

- univerzální svařovací zařízení;
- cyklová zařízení;
- zařízení pro kontinuální svařování.

Schéma univerzálního svařovacího zařízení je znázorněno na obr. 11. Všechna výše uvedená zařízení se skládají z následujících základních prvků:

Elektronové dělo – základem je termoemisní zdroj elektronů, kterým bývá nejčastěji wolframové nebo tantalové vlákno ohnuté do tvaru písmene V a je zahřáto na vysokou teplotu (až 2 700 °C) buď přímo průchodem elektrického proudu, nebo nepřímo pomocí vnějšího vinutí. Tento termoemisní zdroj je zároveň katodou triodového systému. Kolem katody je kontrolní elektroda, tzv. Wehneltův válec, který nám umožňuje regulovat množství elektronů urychlovaných směrem k anodě. Elektrony jsou urychlovány od katody směrem k anodě pomocí vysokého napětí, přičemž anoda je na nulovém potenciálu a rozdíl potenciálu, a tím zároveň i rychlost elektronů, je regulován pouze přívodem vysokého napětí na katodu. [14, 20]



Obrázek 12: Zařízení pro EBW [21]

Fokusační cívky – je to soustava elektromagnetických cívek, které působí na EB podobně jako optické čočky na světlo. Pomocí těchto cívek můžeme měnit směr dráhy pohybu elektronů bez ovlivnění jejich rychlosti a tím docílit fokusace EB přímo na povrch, popřípadě pod povrch svařované součásti. [18, 20]

Vychylovací systém – slouží k ovládání pohybu EB po povrchu svařované součásti. Jedná se o elektromagnetickou cívku, která je umístěna pod fokusačními cívkami, která pomocí velikosti a směru elektromagnetického pole vychyluje dráhu EB. [14]

Pracovní komora – je to prostor, ve kterém probíhá proces svařování. Velikost pracovní komory závisí na typu zařízení a velikosti svařovaných součástí. Pracovní komora obsahuje zařízení pro uchycení a polohování svařované součásti. Pracovní komora také slouží pro odstínění RTG záření, které vzniká při svařování. [14, 19, 20]

Vakuový systém – v horní části zařízení, tj. v elektronové komoře, vakuum slouží jako ochrana proti oxidaci katody, která je ohřátá na vysokou teplotu a zároveň slouží jako dobrý izolátor mezi elektrodami. V pracovní komoře je vakuum vyžadováno zejména proto, aby nedocházelo k rozptylu a snižování energie EB srážkami s molekulami vzduchu. Vakuum v pracovní komoře také chrání samotný svarový kov před oxidací. K dosažení vakua se používá soustava vývěv. Vakuová soustava se skládá z rotační vývěvy, která dokáže vytvořit vakuum až 10^{-1} Pa, a difuzní vývěvy nebo turbomolekulární vývěvy, která dokáže vytvořit vakuum až 10^{-4} Pa. [14, 18, 20]

Zdroj vysokého napětí – slouží jako zdroj urychlovacího a kontrolního napětí triodového systému elektronového děla. Skládá se z transformátoru a usměrňovače. [18, 19]

3.2 Vliv procesních parametrů

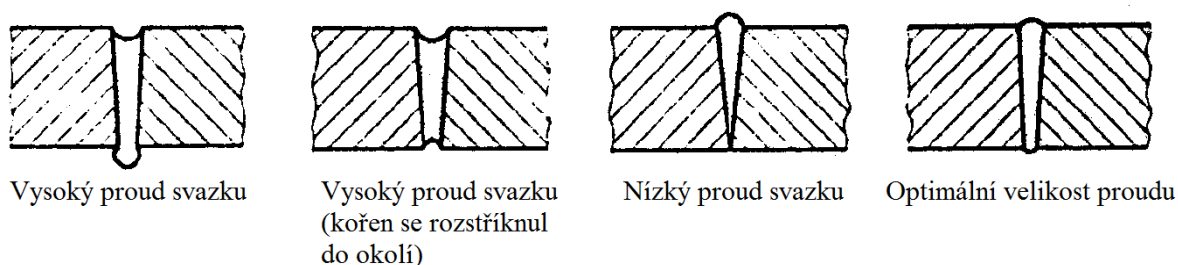
Proces EBW je řízen procesními parametry, které přímo ovlivňují výslednou strukturu a tvar svarového spoje. Optimalizací těchto parametrů tak lze docílit kvalitního svarového spoje a minimalizovat množství vad ve svaru. Nastavení procesních parametrů se pro různé typy materiálů a jejich tloušťky značně liší, proto se vždy před svařováním nového typu materiálu, popř. změně tloušťky, musí dbát důraz na optimalizaci těchto parametrů.

Urychlovací napětí U_A – spolu s proudem svazku I_B patří mezi nejdůležitější parametry, protože určují výkon P_B . Urychlovací napětí dodává volným elektronům rychlost a určuje jejich kinetickou energii a jeho velikost bývá zpravidla konstantní po celou dobu svařování. Má také vliv na penetrační hloubku d_p do které EB proniká (viz tab. 2). Penetrační hloubka roste s urychlovacím napětím pro různé materiály různě. [18-20]

Tabulka 2: Penetrační hloubka EB (v μm) pro různé typy materiálů v závislosti na U_A [20]

	Mg	Al	Ti	Cu	Fe	W
60 kV	35	23	14	7	8	3
120 kV	112	72	43	22	25	10

Proud svazku I_B – proudem svazku se řídí výkon svazku a tedy celkové množství vnesené energie do svařovaného materiálu. Při příliš vysokém proudu poklesne povrchové napětí taveniny na stěnách keyhole, které nevyrovná gravitační sílu a dojde k propadu hlavy a kořene svaru. Naopak při nízké hodnotě proudu nepronikne EB do celé hloubky materiálu a bude docházet k neprůvarům a růst výskyt vad v kořeni svaru. [18, 20]

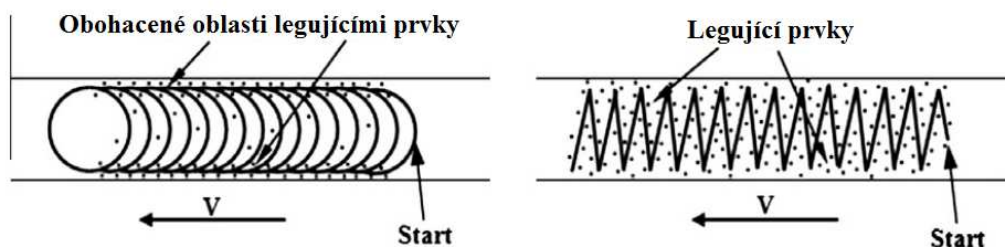


Obrázek 13: Vliv velikosti proudu svazku na vzhled svaru [18]

Rychlost svařování v – určuje spolu s výkonem svazku množství roztaveného materiálu a tím i tvar svaru. Rychlost svařování je ovládána pomocí posuvného stolku, ve kterém je uchycen materiál v pracovní komoře. Při změně rychlosti svařování se musí měnit i výkon EB, aby nedocházelo k obdobným vadám, jako jsou na obr. 13. [18]

Fokusace svazku – používá se k zaostření svazku na povrch nebo pod povrch svařovaného materiálu a dosažení vysoké proudové hustoty. Fokusace svazku je zprostředkována fokusacími cívkami, které ovlivňují dráhu pohybu elektronů bez změny jejich energie. Poloha fokusace EB v z souřadnici se ovládá velikostí proudu protékajícího fokusacími cívkami. Fokusací svazku se ovlivňuje velikost plochy, na kterou dopadá EB, což ovlivňuje i tvar svaru. [14, 18]

Oscilace svazku – změnou velikosti proudu procházejícího oscilačními cívkami lze řídit pohyb EB po povrchu svařovaného materiálu a tím i dynamicky měnit rozložení energie. Oscilací EB můžeme měnit velikost keyhole a ovlivňovat rozložení legujících prvků (obr. 14) v oblasti svarového kovu. [16, 18]



Obrázek 14: Vliv oscilace na rozložení legujících prvků: a) kruhová, b) lineární [16]

Nastavování procesních parametrů pro materiál o dané tloušťce se provádí pomocí zkušebních svarů. Tento postup je jediná možnost, jak vyhodnotit vliv jednotlivých procesních parametrů na svarový spoj a optimalizovat proces pro dosažení kvalitních svarů. [18]

Mezi hlavní výhody EBW patří: velmi úzké a hluboké svary, možnost svařovat tloušťky 0,1 až 200 mm, malá HAZ, minimální deformace v oblasti svaru, dokonalá ochrana povrchu materiálu díky vakuu, snadná regulace výkonu EB, možnost svařování velké škály materiálů a jejich kombinací, svařování na jednu svarovou housenku a její dobrý vzhled. Naproti tomu mezi hlavní nevýhody patří: rychlý odvod tepla z oblasti svaru, vysoká pořizovací cena a omezení velikosti svařence podle velikosti pracovní komory. [14]

Experimentální část

4. Experimentální materiál

Ne experiment byla použita titanová slitina Ti6Al4V (DIN 3.7165). Byly svařovány plechy o tloušťce 20 mm, které byly dodány po TZ. Předepsané chemické složení dané slitiny je v následující tabulce.

Tabulka 3: Chemické složení (hm. %)

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ostatní		Ti
							jednotlivě	celkem	
5,5-6,75	4,5-5,5	max. 0,40	max. 0,02	max. 0,10	max. 0,05	max. 0,015	max. 0,10	max. 0,40	zbytek

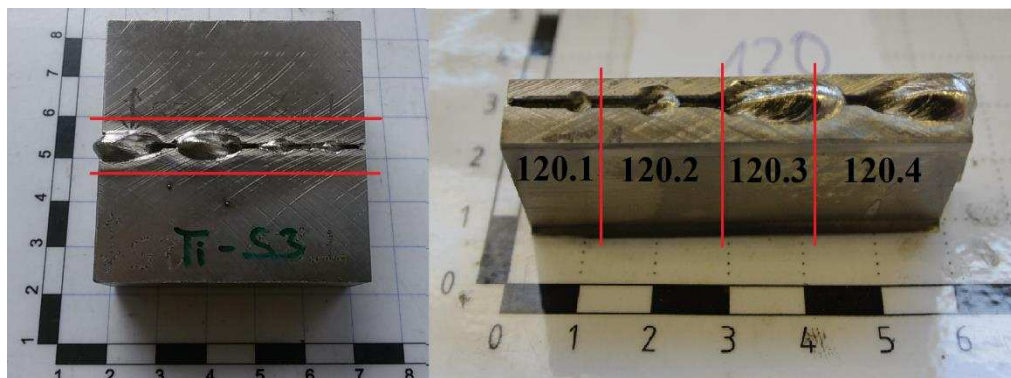
5. Experimentální metody

Na experimentální část byly dodány již svařené vzorky i s procesními parametry nastavení EB pro jednotlivé svary, které jsou uvedeny v tab. 4. Svařování vzorků bylo provedeno na univerzálním komorovém zařízení EBG 60-150 K26 od firmy pro-beam (Německo) a bylo provedeno na Ústavu materiálových věd a inženýrství.

Tabulka 4: Hodnoty procesních parametrů

Vzorek	U _A [kV]	I _B [mA]	v [mm/s]	SURF [mA]	f [Hz]	ϕ _{spot} [mm ²]
Ti-S3	120	28	5	-10	1000	0,4x0,4
Ti-Ú1	120	28	5	-6	1000	0,4x0,4
120	120	28	5	-8	750	0,4x0,4
110	110	30,5	5	-8	750	0,4x0,4
100	100	33,6	5	-8	750	0,4x0,4
90	90	37,3	5	-8	750	0,4x0,4
80	80	42	5	-8	750	0,4x0,4
70	70	48	5	-8	750	0,4x0,4
č. 1	120	28	5	-10	500	0,4x0,4
č. 2	120	28	7,5	-10	500	0,4x0,4
č. 3	120	28	6	-10	500	0,4x0,4

Ze svařených vzorků byly připravovány metalografické výbrusy, přičemž z každého vzorku byly připraveny čtyři výbrusy s označením např. 120.1 až 120.4 (viz obr. 15). Vzorky byly nejprve rozřezány na poloautomatické rozbrušovače MSX250 od firmy LECO, kterou byly provedeny podélné řezy (obr. 15 vlevo), poté na rozbrušovače Discotom-2 od firmy Struers, kterou byly provedeny příčné řezy (obr. 15 vpravo).



Obrázek 15: Roviny řezů ve vzorcích

Na obou rozbrušovačkách byl použit kotouč z karbidu křemíku. Rozřezané vzorky byly zality do kombinace zalévacích hmot MultiFast Green a ClaroFast v lisu PR-4X od firmy LECO. Zalité vzorky byly broušeny a leštěny na zařízení od firmy LECO GPX 300. Broušení probíhalo postupně na brusných papírech o zrnitosti od 500 do 4000. Leštění bylo prováděno na leštícím plátně s diamantovou pastou o zrnitosti 3 μm a poté 0,7 μm . Na následné leptání bylo použito leptadlo Kroll I., jehož chemické složení je uvedeno v tab. 5.

Tabulka 5: Kroll I.

Podíl složky [obj. %]	Složka	Zdrojová koncentrace složky [obj. %]
11	HF	38-40
33	NHO ₃	65
56	H ₂ O	100

Hotové metalografické výbrusy byly pozorovány a foceny na světelném mikroskopu GX51 od firmy Olympus a na stereomikroskopu Stemi 508 od firmy ZEISS. U každého snímku, použitého v této bakalářské práci, je v závorce uvedeno původní zvětšení.

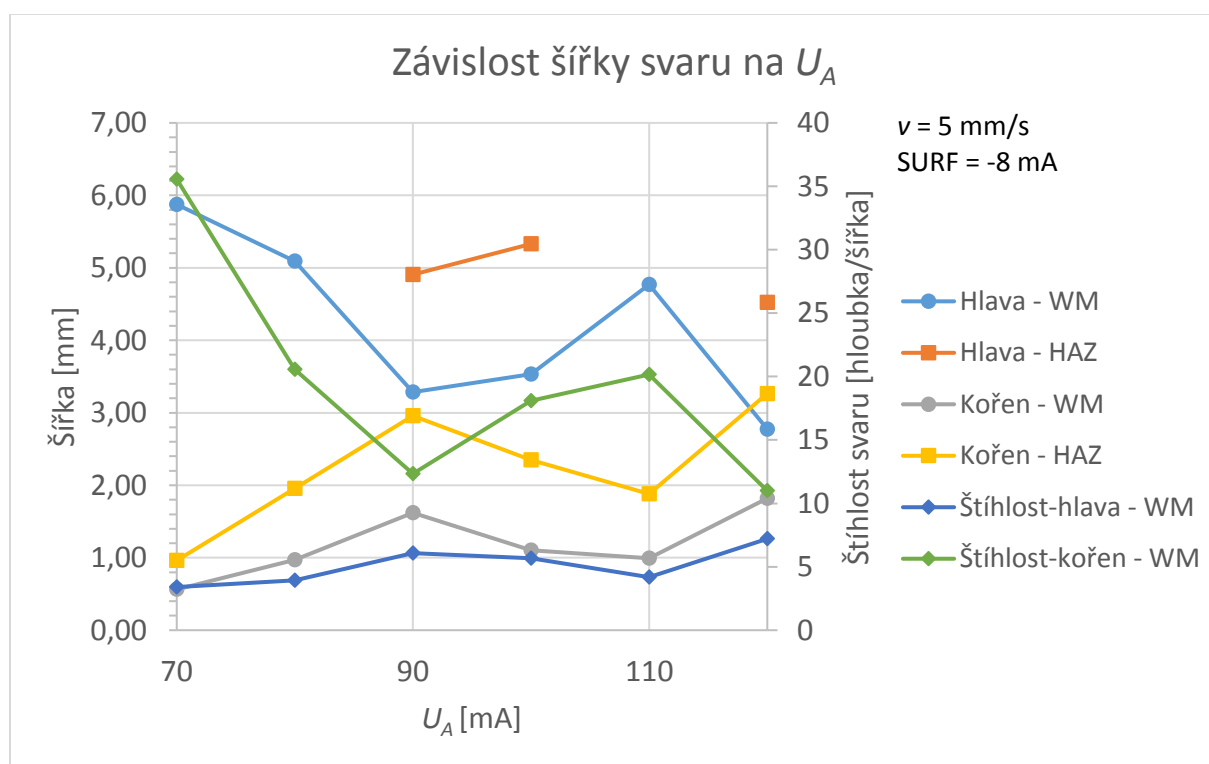
Na vybraných vzorcích byla dále měřena mikrotvrdost na automatickém mikrotvrdoměru LM247AT od firmy LECO, metodou dle Vickerse se zatížením 1 N po dobu 10 s. Na každém vzorku byla provedena řada 60 vpichů přes WM, HAZ i základní materiál ve vzdálenosti 5 mm od povrchu (hlavy svaru).

6. Vyhodnocení vzorků

6.1 Vliv urychlovacího napětí U_A

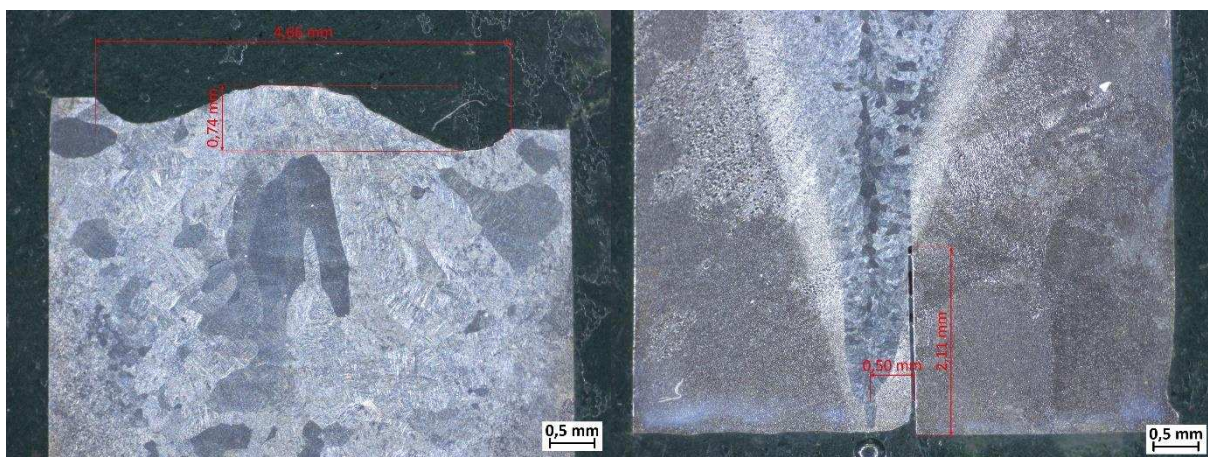
Vliv urychlovacího napětí v rozmezí od 70 do 120 kV byl zkoumán na šesti vzorcích. U vzorků 70 a 80 docházelo vlivem nízkého U_A k neprůvarům a to až 2,4 mm (obr. 19), respektive 1,9 mm (obr. 21). U vzorků 70, 80 a 110 se svar výrazně zužuje směrem ke kořeni. (Obr. 17 až 22 a 29, 30)

Na obr. 16 je znázorněna závislost šířky WM a HAZ hlavy i kořene a štíhlost WM, která je vyjádřena jako poměr hloubky a šířky svaru, na velikosti urychlovacího napětí U_A . Všechny hodnoty šířky HAZ byly měřeny včetně WM, tzn. přes celý svar. Při svařování všech těchto vzorků byl konstantní výkon EB, tzn., že s rostoucím urychlovacím napětím klesal proud svazku.

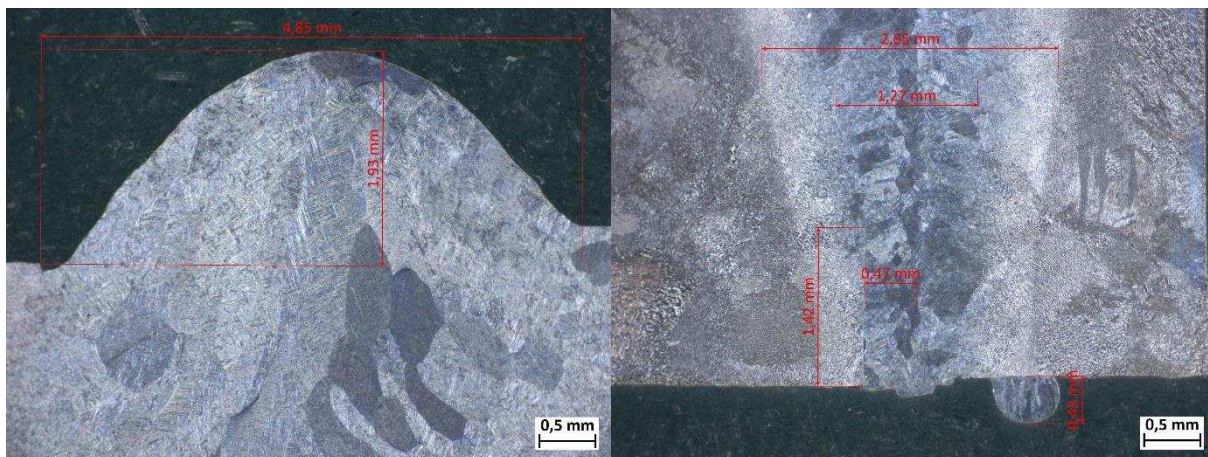


Obrázek 16: Graf závislosti šířky svaru na U_A

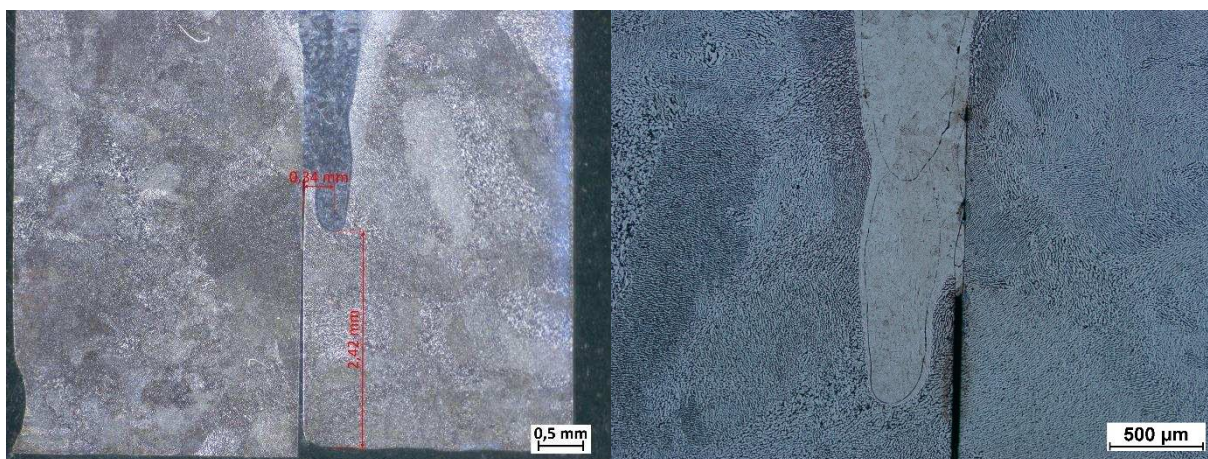
Vzorek 70



Obrázek 17: Vzorek 70.1 (16x)



Obrázek 18: Vzorek 70.3 (20x)



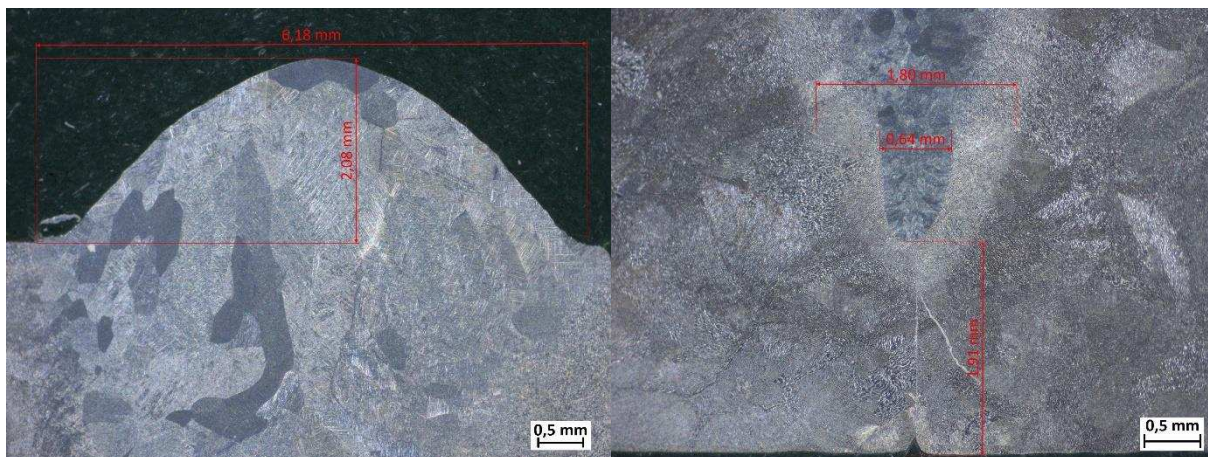
Obrázek 19: Vzorek 70.4 kořen (16x a 50x); snímky jsou zrcadlově převráceny

Při urychlovacím napětí 70 kV vznikla nesouvislá hlava a převážně neprovařený kořen. V kořeni vznikaly dutiny, které jsou viditelné na obr. 19. Dutiny vznikly v důsledku malého množství vneseného tepla do kořene svaru a rychlého ochlazení stěn kavity s následným zatečením taveniny, která se nespojila s již ztuhlým kovem. Z obr. 17 a 19 je patrné, že EB byl pravděpodobně naveden mimo tupý spoj.

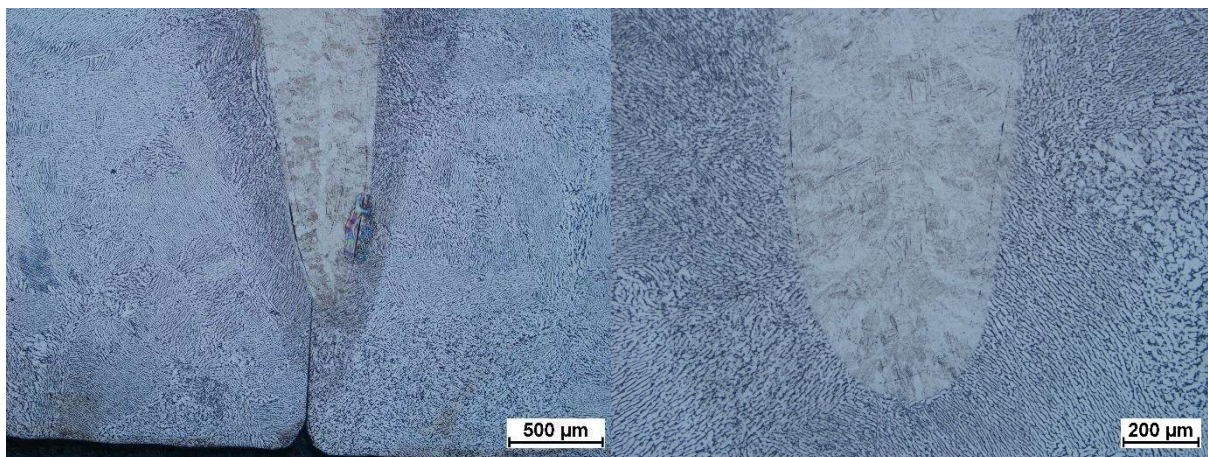
Vzorek 80



Obrázek 20: Vzorek 80.1 (16x a 20x)



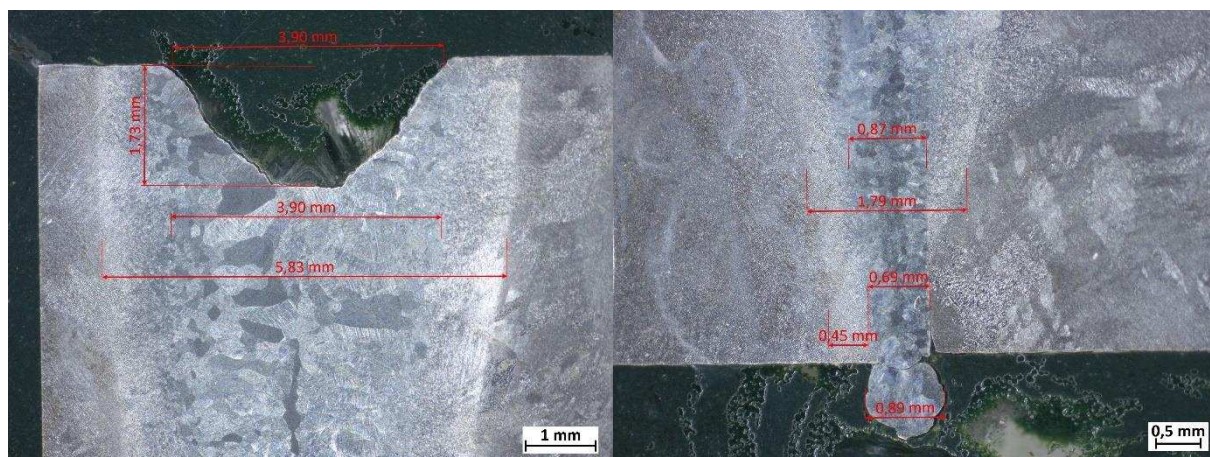
Obrázek 21: Vzorek 80.2 (16x a 20x)



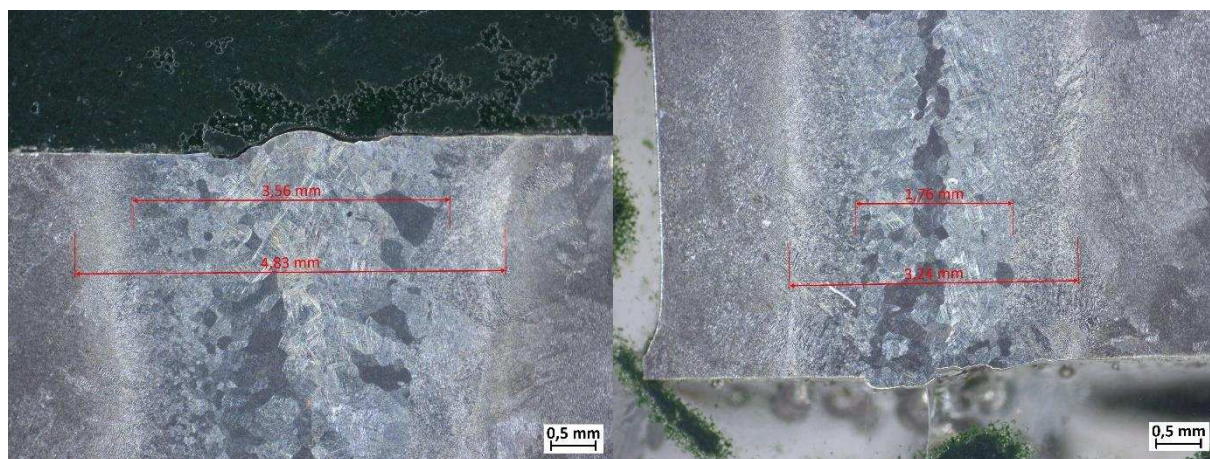
Obrázek 22: Vzorky 80.3 a 80.2 (50x a 100x)

Svar ve vzorku 80 má velmi podobný průběh jako ve vzorku 70. V místech s provařeným kořenem docházelo k mírnému protečení a v místech s neprovařenými kořeny se objevovaly dutiny (obr. 22) podobného charakteru jako u vzorku 70.

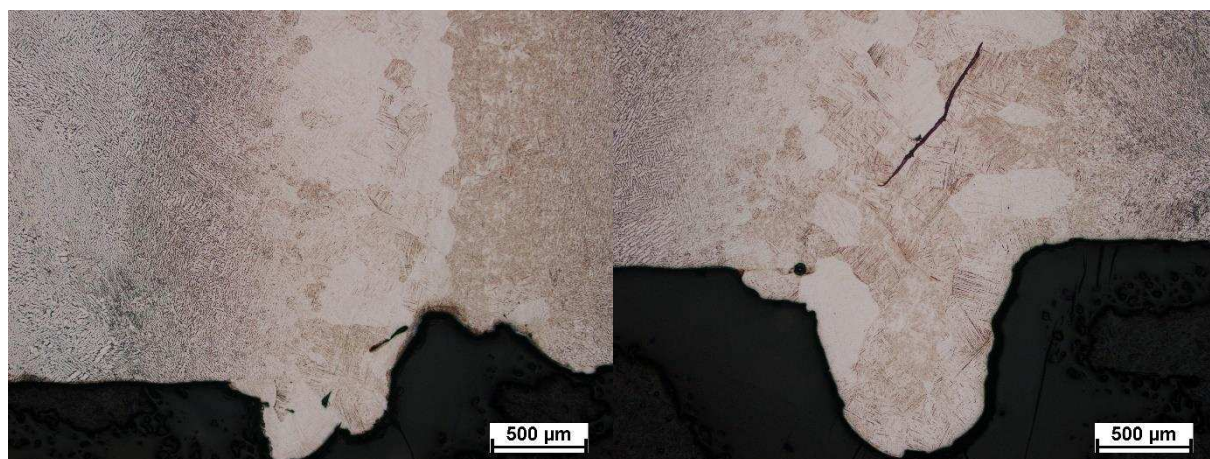
Vzorek 90



Obrázek 23: Vzorek 90.1 (12,5x a 16x)



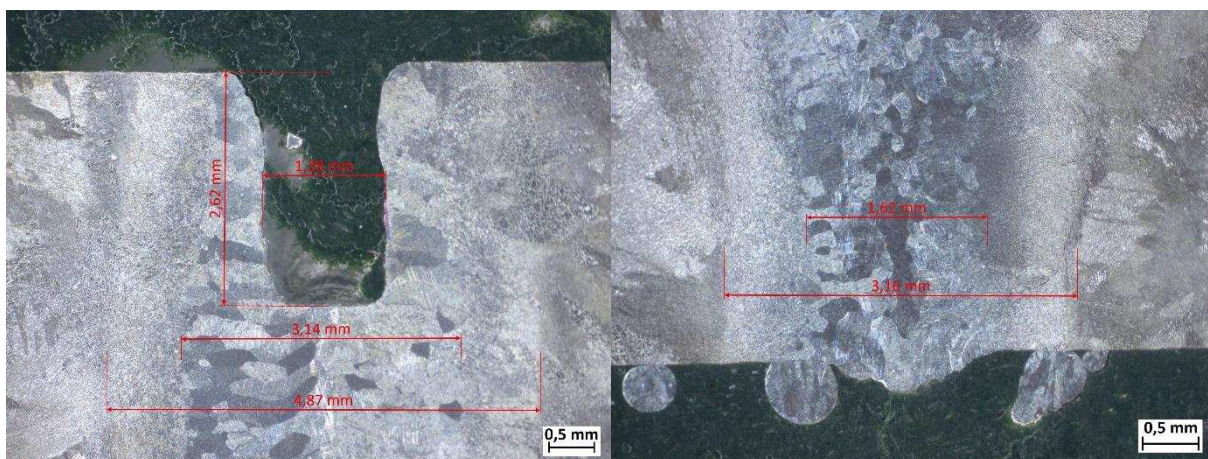
Obrázek 24: Vzorek 90.2 (16x)



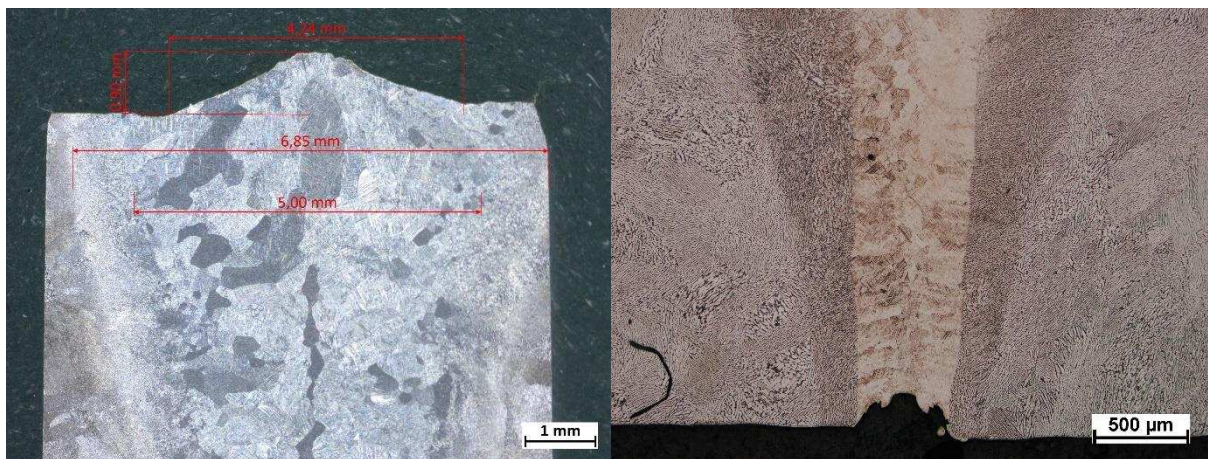
Obrázek 25: Vzorky 90.3 a 90.4 (50x)

Vzorek 90 má převážně propadlou hlavu a kořen v celé délce s výrazným protečením. U tohoto vzorku nedocházelo k výraznému zužování svaru směrem ke kořenu. V kořeni svaru se vyskytovaly dutiny, které jsou patrné na obr. 25 ve vzorcích 90.3 a 90.4.

Vzorek 100



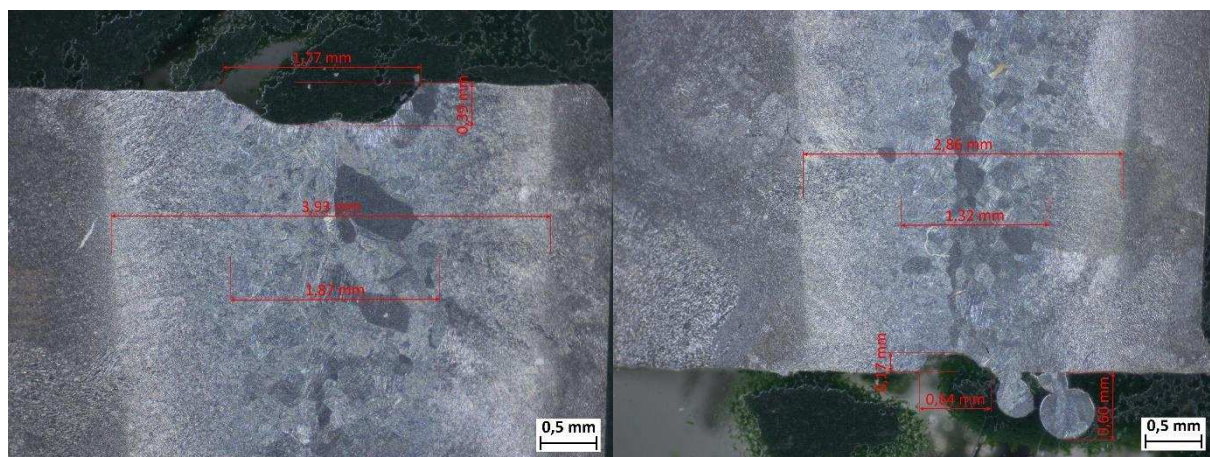
Obrázek 26: Vzorek 100.1 (16x a 20x)



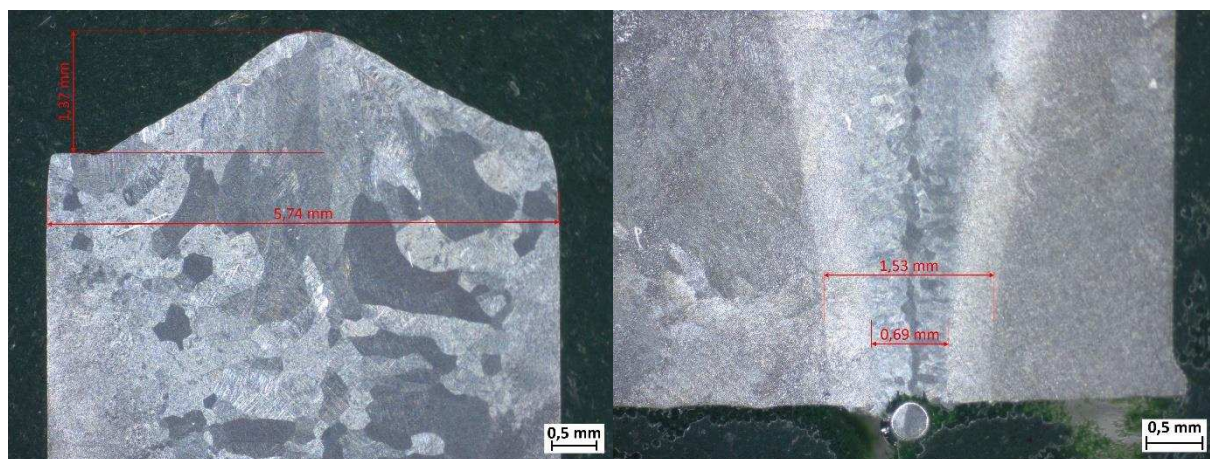
Obrázek 27: Vzorek 100.2 (12,5x a 50x)

Vzorek 100 má opět nesouvislou hlavu a místy výrazně zúžený kořen s protečením a rozstříky.

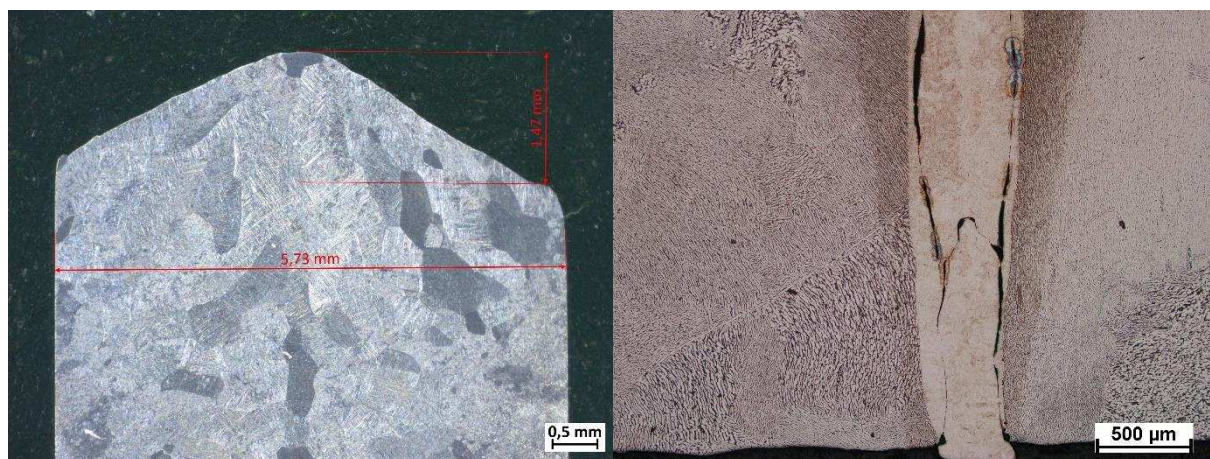
Vzorek 110



Obrázek 28: Vzorek 110.1 (20x)



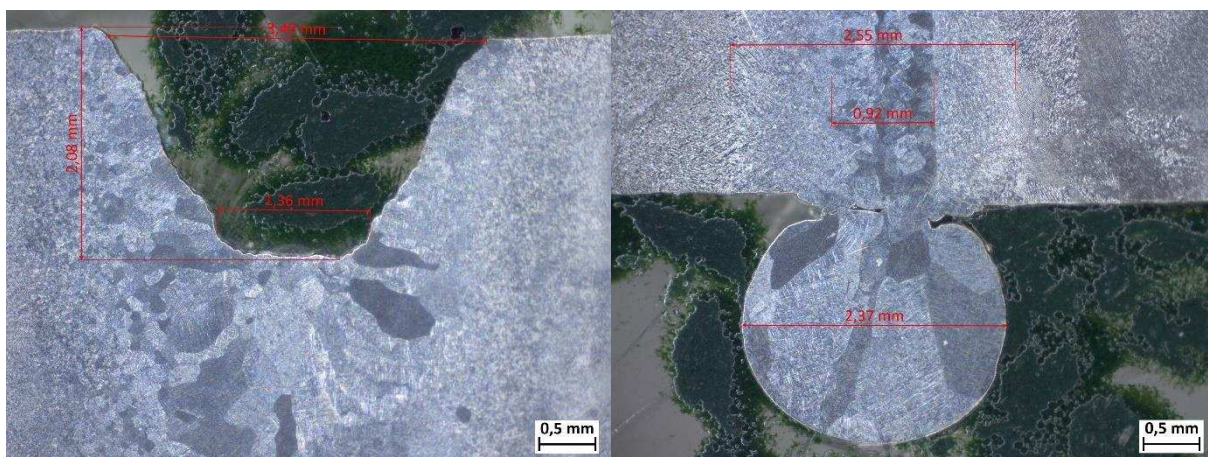
Obrázek 29: Vzorek 110.2 (16x a 20x)



Obrázek 30: Vzorek 110.4 (16x a 50x)

U vzorku 110 docházelo k rozšiřování hlavy a výraznému zužování kořene. V místech kde je kořen výrazně zúžený docházelo ke vzniku dutin (viz obr. 30) podobného charakteru jako u vzorků 70 a 80.

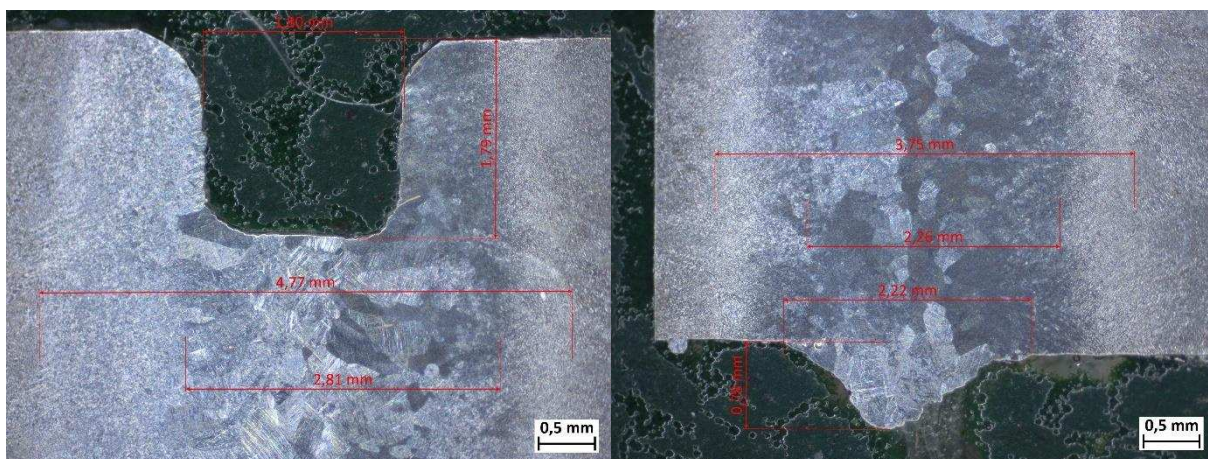
Vzorek 120



Obrázek 31: Vzorek 120.1 (20x)



Obrázek 32: Vzorek 120.2 (20x)



Obrázek 33: Vzorek 120.3 (20x)

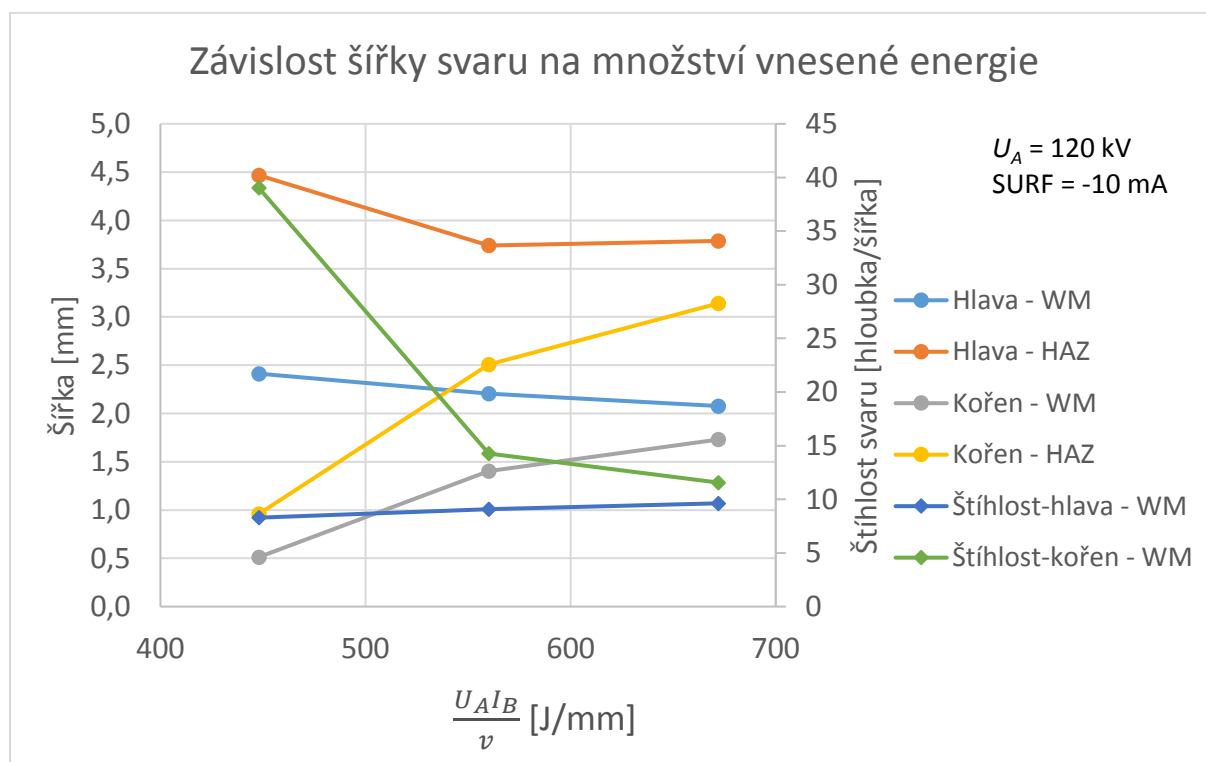
Vzorek měl v některých místech mírně zužující se průřez svaru s nesouvislou hlavou, přičemž propadení hlavy bylo až 2,6 mm (obr. 32), a místy s výrazně protečeným kořenem.

6.2 Vliv rychlosti svařování v

Vliv rychlosti svařování byl posuzován na třech vzorcích s rychlostí posuvu 5, 6 a 7,5 mm/s. Vzhledem ke stejnému výkonu EB se s rostoucí rychlostí snižovalo množství energie vnesené do materiálu. Množství vnesené energie je tedy nepřímo úměrné rychlosti svařování.

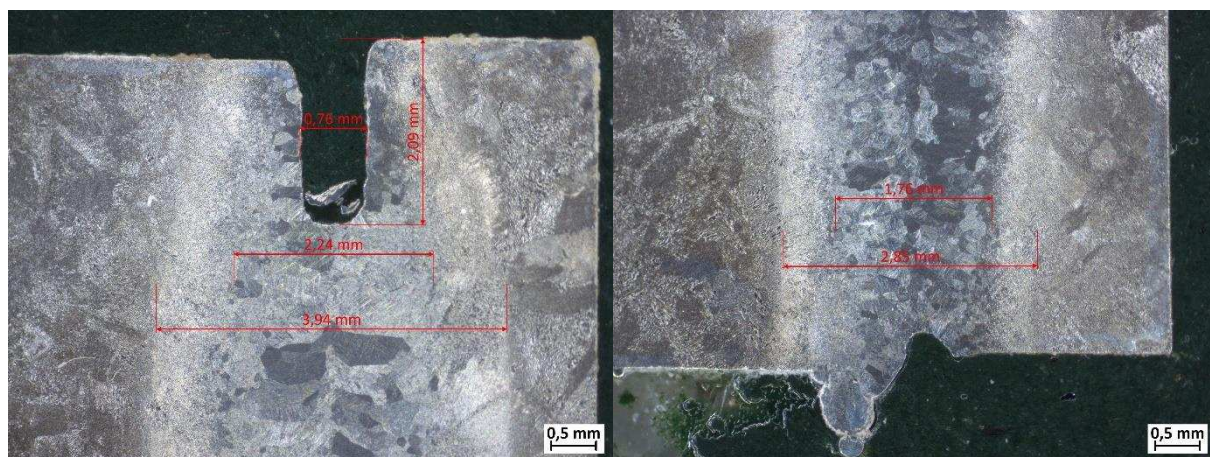
Vzorky č. 1 a č. 3 s rychlostí svařování 5 a 6 mm/s mají velmi podobný mírně se zužující průřez svaru. Zatím co u vzorku č. 1 (obr. 35 a 36) došlo k propadnutí hlavy v celé délce, tak u vzorku č. 3 (obr. 40 a 41) byla nesouvislá hlava, která byla místy propadlá a místy vyboulená. U vzorku č. 2 (obr. 37-39) s rychlostí svařování 7,5 mm/s vznikla souvislá hlava, ale svar se zužuje směrem ke kořeni a v kořeni se nachází velké množství vad typu neprůvarů a dutin. Obecně lze konstatovat, že při nízkých hodnotách rychlosti svařování bude docházet k propadnutí hlavy a protečení kořene, a naopak při vysokých rychlostech bude docházet k neprůvarům a vyššímu výskytu vad v kořeni.

V následujícím obr. 34 je vynesena štiřlost WM a šířka WM a HAZ v oblasti hlavy a kořene v závislosti na množství vnesené energie.

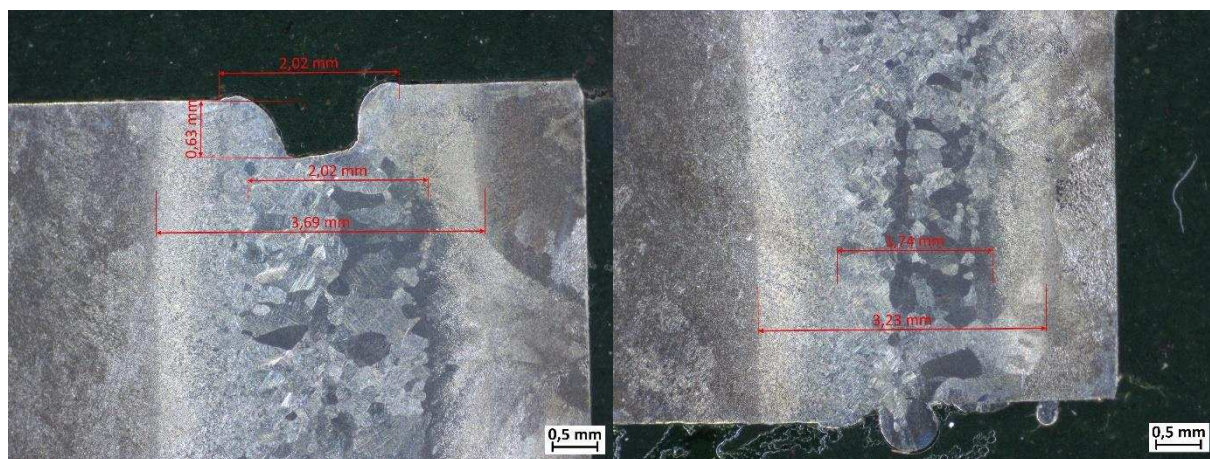


Obrázek 34: Graf závislosti šířky svaru na množství vnesené energie

Vzorek č. 1



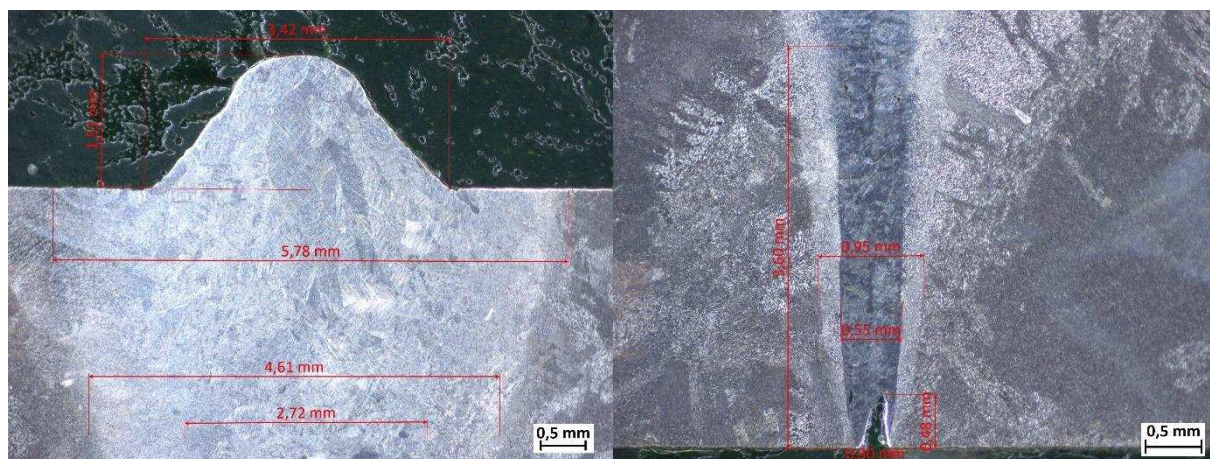
Obrázek 35: Vzorek č. 1.1 (16x)



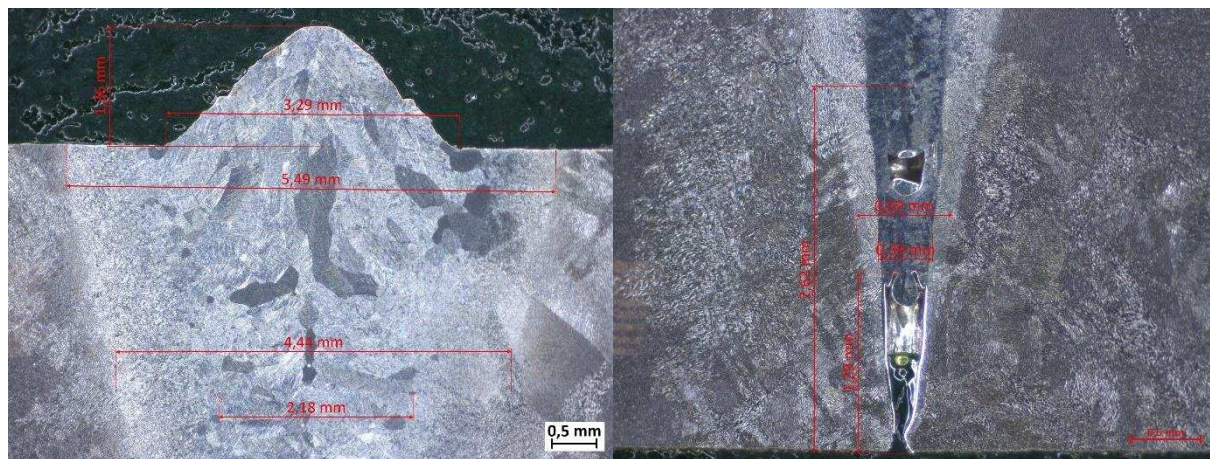
Obrázek 36: Vzorek č. 1.2 (16x)

Z obrázků 35 a 36 je zřejmé, že u svaru ve vzorku č. 1 krom propadnutí hlavy docházelo také k protečení a rozstříku kořene.

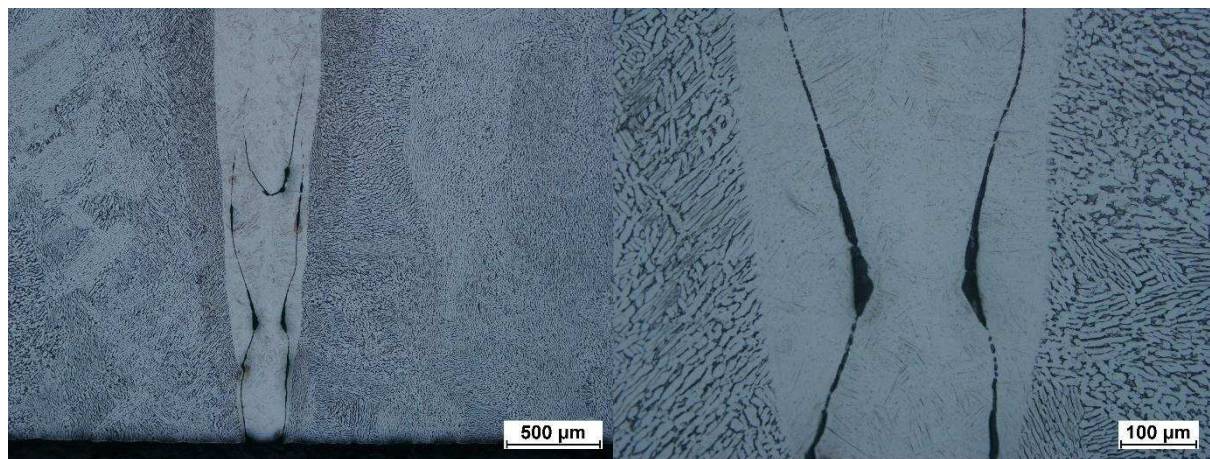
Vzorek č. 2



Obrázek 37: Vzorek č. 2.1 (16x a 20x)



Obrázek 38: Vzorek č. 2.3 (16x a 25x)

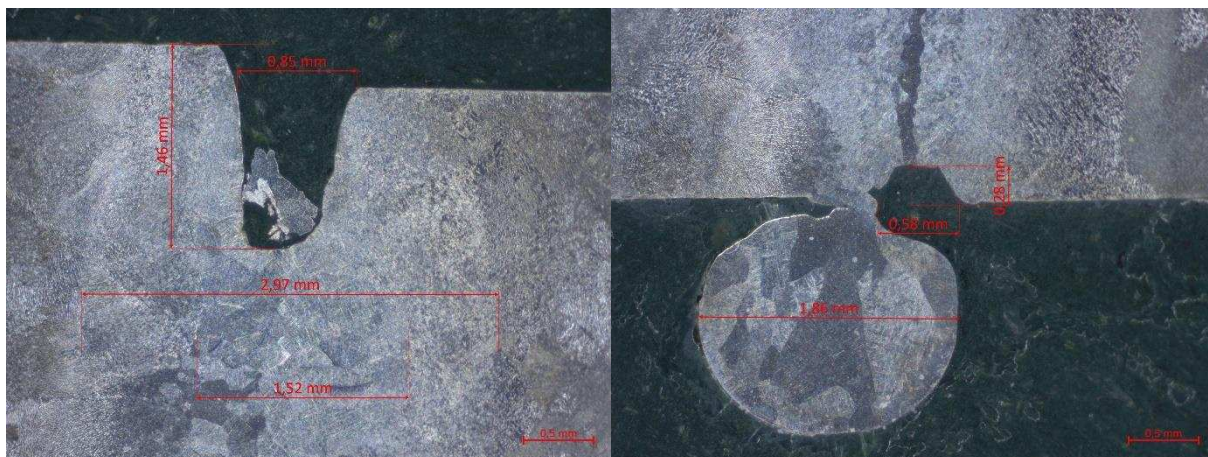


Obrázek 39: Vzorek č. 2.2 (50x a 200x)

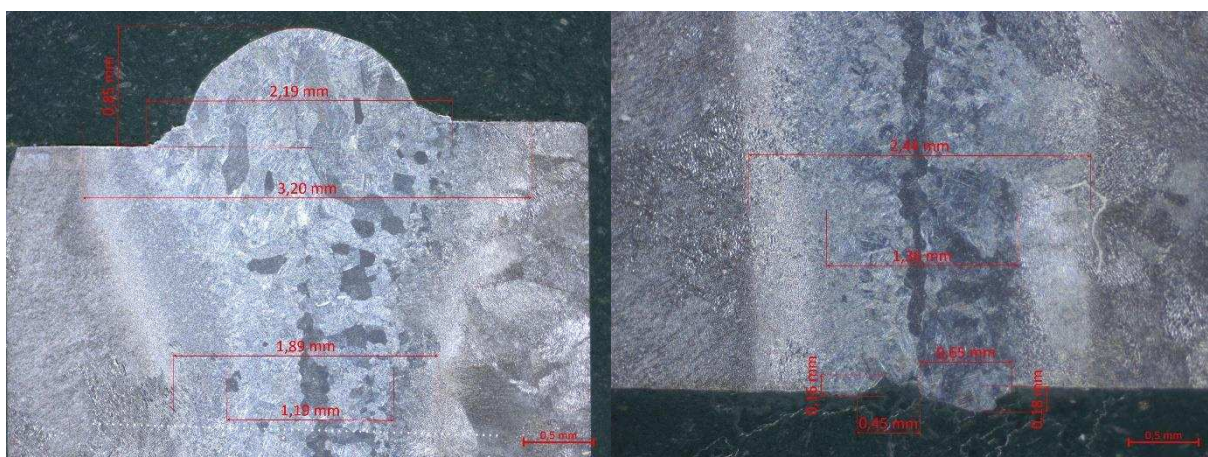
Na snímcích kořene vzorku č. 2 jsou zřejmé neprůvary (obr 37 a 38) a dutiny (obr. 38 a 39), které jsou způsobeny vysokou rychlostí svařování. Ke vzniku dutin v kořeni znázorněných na obrázku 39 docházelo v důsledku rychlého ochlazení natavených stěn keyhole a následnému

stečení tavenin mezi ztuhlé stěny. Na vzorku č. 2.2 (obr. 39) je v kořeni přímý přechod ze svarového kovu do základního materiálu bez pozorovatelné HAZ.

Vzorek č. 3



Obrázek 40: Vzorek č. 3.4 (16x)



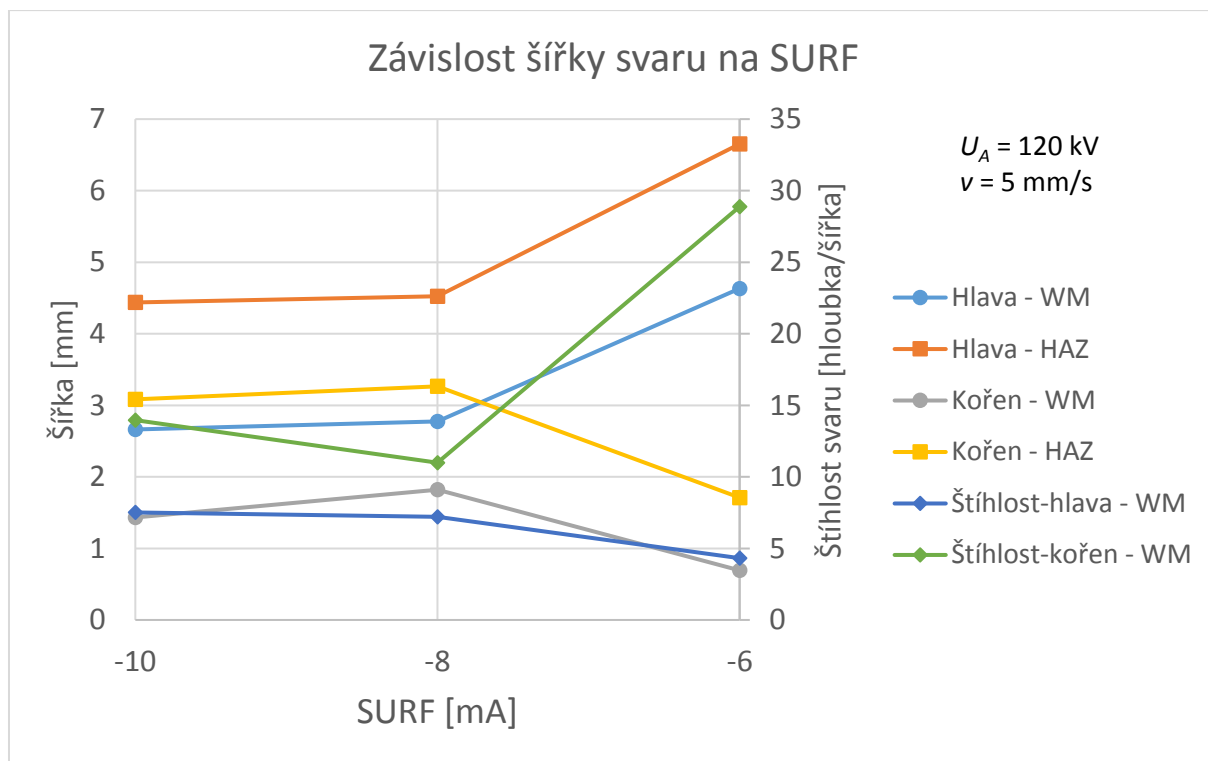
Obrázek 41: Vzorek č. 3.2 (16x)

U vzorku č. 3 docházelo krom nesouvislé hlavy také k výraznému protečení a rozstříku kořene. K protečení kořene došlo hlavně v místech s propadenou hlavou.

6.3 Vliv fokusace

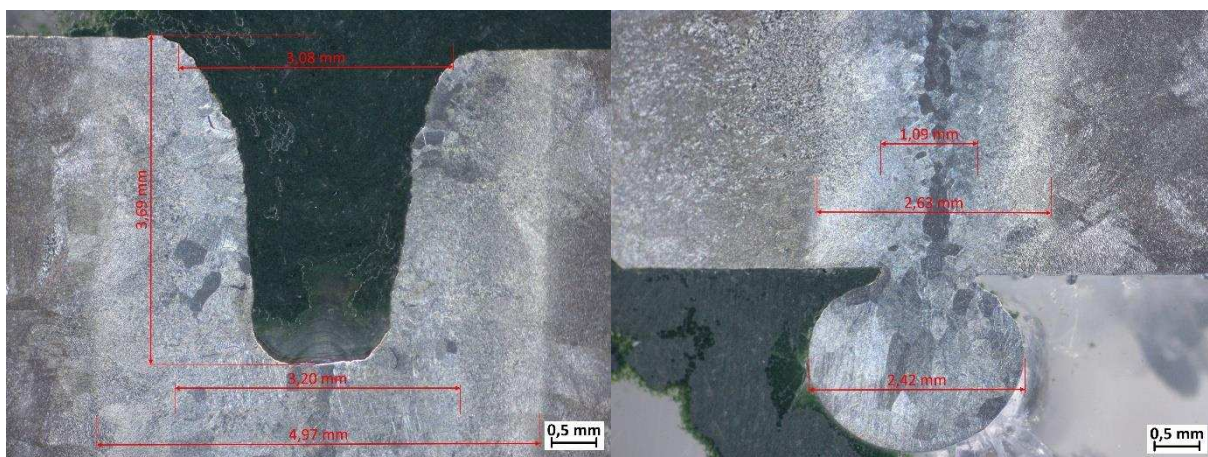
Ze vzorků Ti-S3, Ti-Ú1 a 120 můžeme usuzovat na vliv fokusace na svarový spoj. Hodnota fokusace v mA přibližně odpovídá vzdálenosti v mm, mezi rovinou na kterou je fokusován EB a povrchem materiálu.

Vliv fokusace na šířku a štíhlost svarového spoje je vyneseno na obr. 42. Z grafu vyplývá, že při přibližování roviny, na kterou je EB fokusován, blíží k povrchu dochází k rozšiřování hlavy a zužování kořene z důvodu většího množství energie vnesené do hlavy a menšího množství do kořene svaru.



Obrázek 42: Graf závislosti šířky svaru na fokusaci

Vzorek Ti-S3



Obrázek 43: Vzorek Ti-S3.1 (16x)



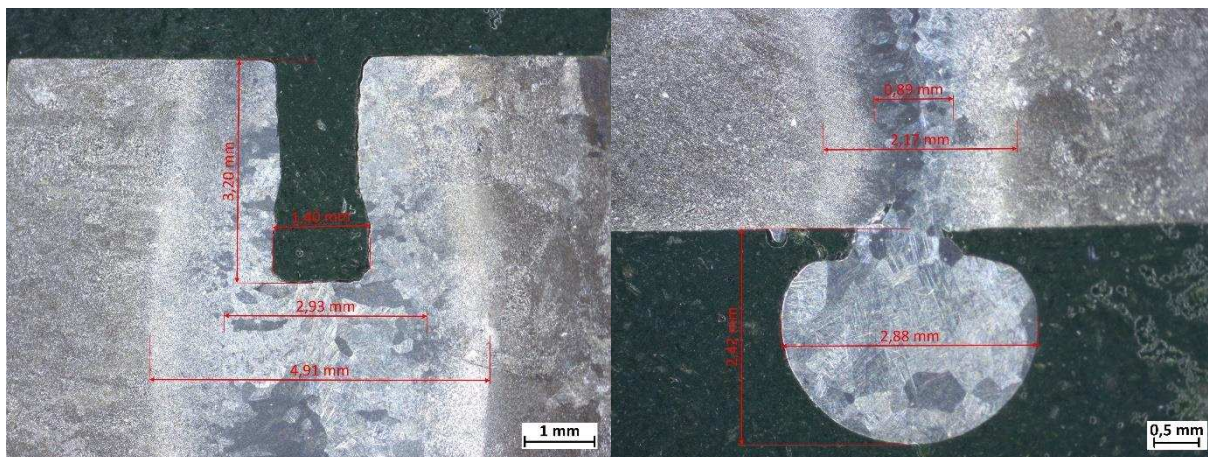
Obrázek 44: Vzorek Ti-S3.3 (16x)

Vzorek Ti-S3 s hodnotou fokusace -10 mA má nesouvislou hlavu, přičemž propady hlavy přesahovaly 3,6 mm (obr. 43), výrazně protečený kořen a mírně se zužující průřez svaru.

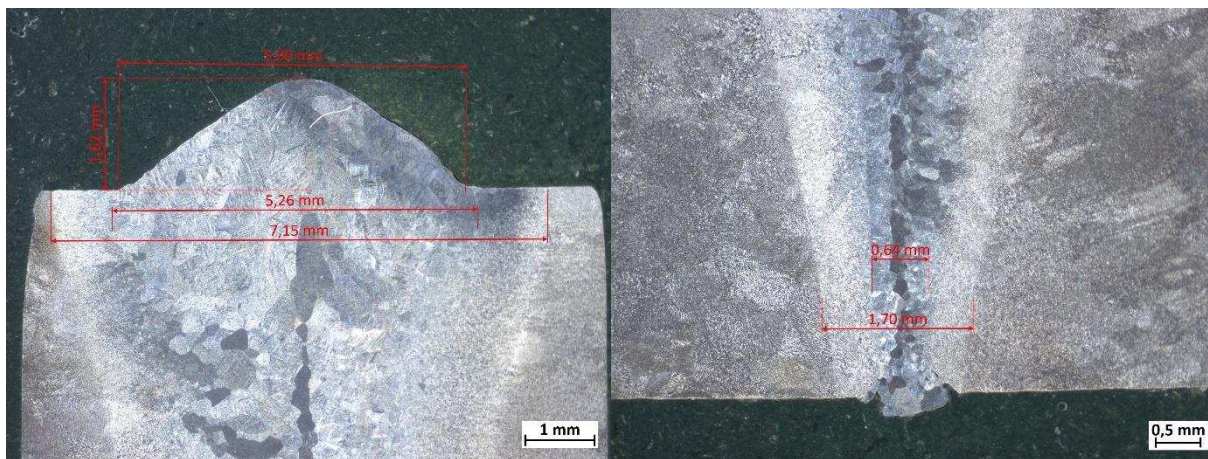
Vzorek 120

U vzorku 120 byla hodnota fokusace -8 mA. Vzorek měl v některých místech mírně zužující se průřez svaru s nesouvislou hlavou, přičemž propadení hlavy bylo až 2,6 mm (obr. 32), a místy s výrazně protečeným kořenem (viz obr. 31-33).

Vzorek Ti-Ú1



Obrázek 45: Vzorek Ti-Ú1.1 (12,5x a 16x)

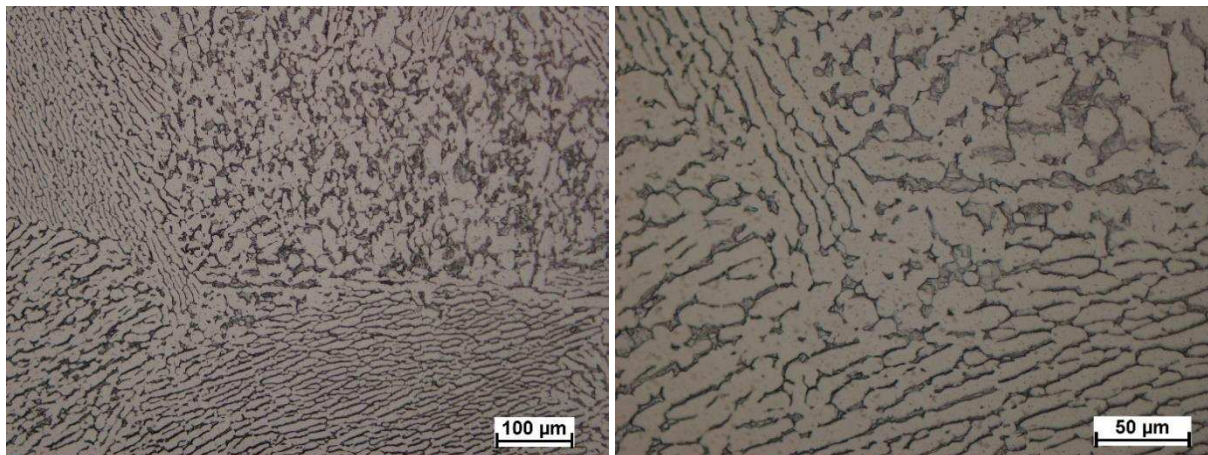


Obrázek 46: Vzorek Ti-Ú1.4 (12,5x a 16x)

Vzorek Ti – Ú1 s hodnotou fokusace -6 mA má místy protečený kořen a nesouvislou hlavu. Vlivem snížení hodnoty fokusačního proudu se kořen svaru výrazně zúžil a hlava se naopak rozšířila.

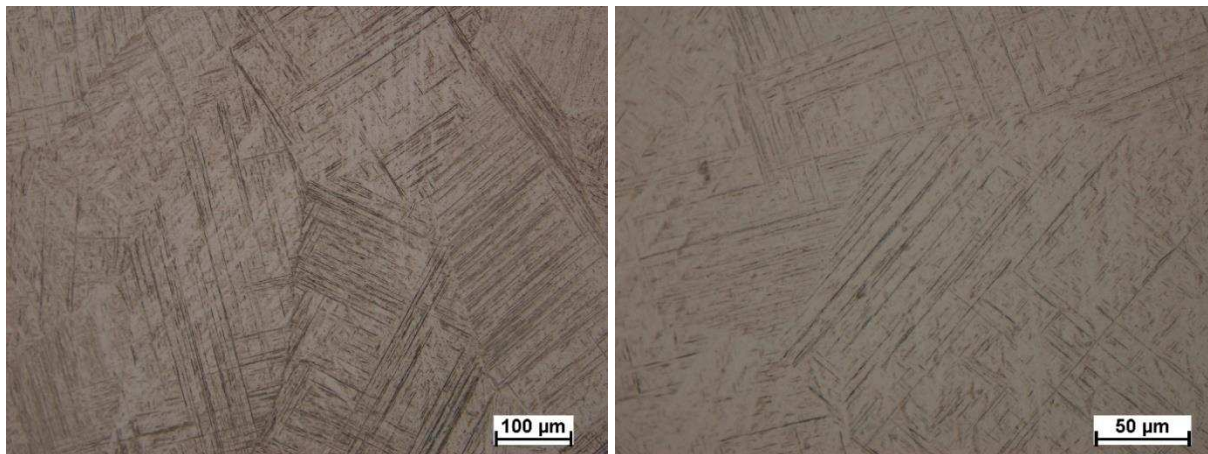
6.4 Rozbor mikrostruktury

Mikrostruktury byly vyhodnocovány téměř na všech studovaných vzorcích. Bylo zjištěno, že mikrostruktury jednotlivých vzorků se v podstatě neliší, jejich popis je tedy uveden pouze pro vzorek s označením 90.2.



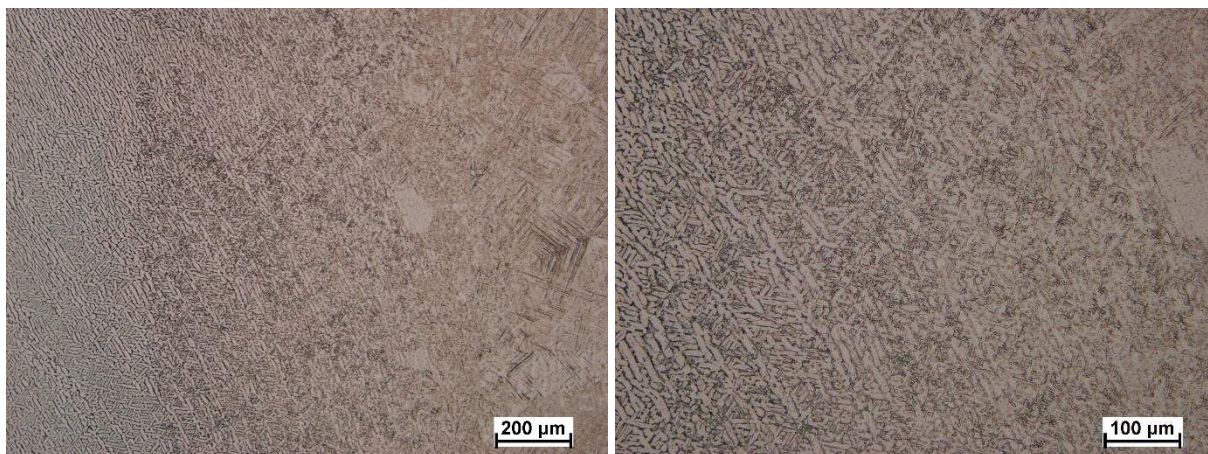
Obrázek 47: Vzorek 90.2 základní materiál (200x a 500x)

Mikrostruktura základního materiálu je uvedena na obr. 47. Převládá hrubá lamelární struktura. Menší podíl zaujímá globulární $\alpha+\beta$ struktura, která je tvořena zrna α fáze na jejichž hranicích se vyskytují nesouvislé obálky fáze β .



Obrázek 48: Vzorek 90.2 WM (200x a 500x)

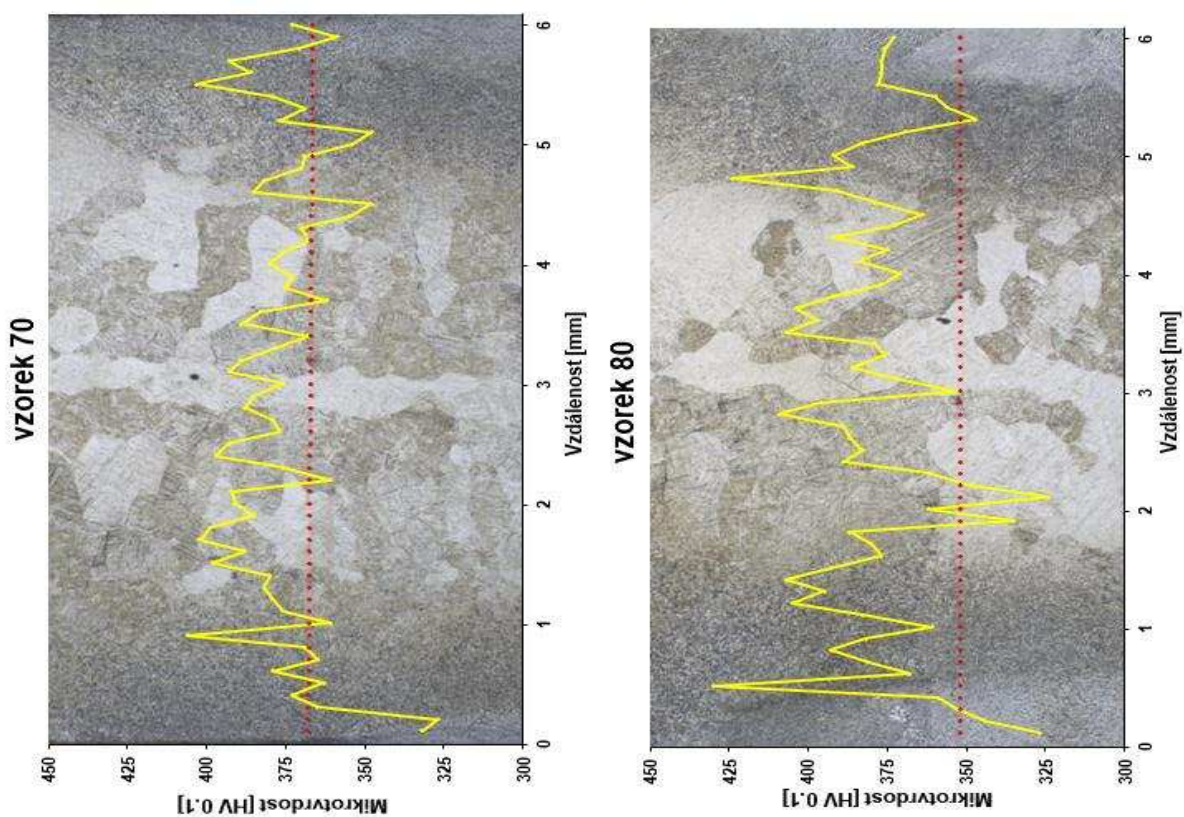
Mikrostruktura svarového kovu je čistě martenzitická, jak je patrné z obr. 48. Zrna výchozí β fáze jsou relativně hrubá, patrně převládá hexagonální α' martenzit (rovnoběžné laťky tvořící pakety).



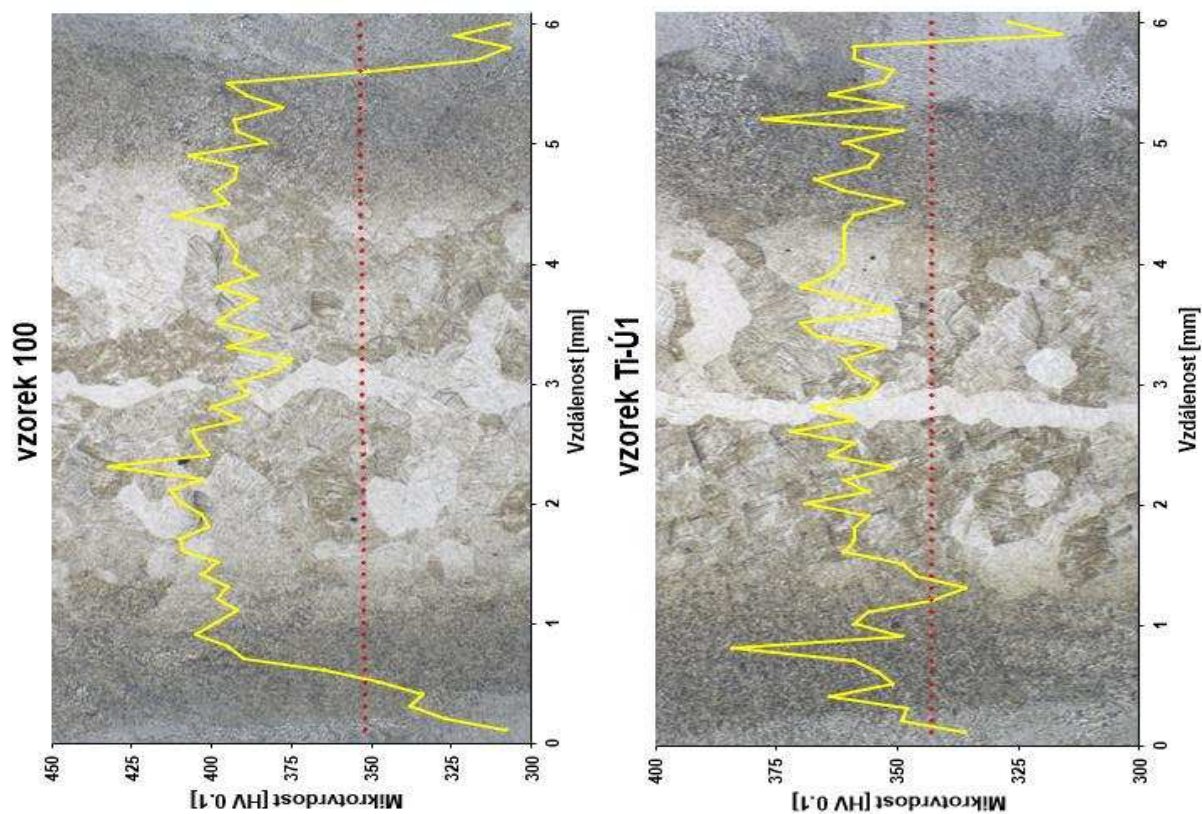
Obrázek 49: Vzorek 90.2 HAZ (100x a 200x)

Tepelně ovlivněná oblast je relativně úzká, viz obr. 49, přičemž převládá lamelární struktura s košíkovou morfologií.

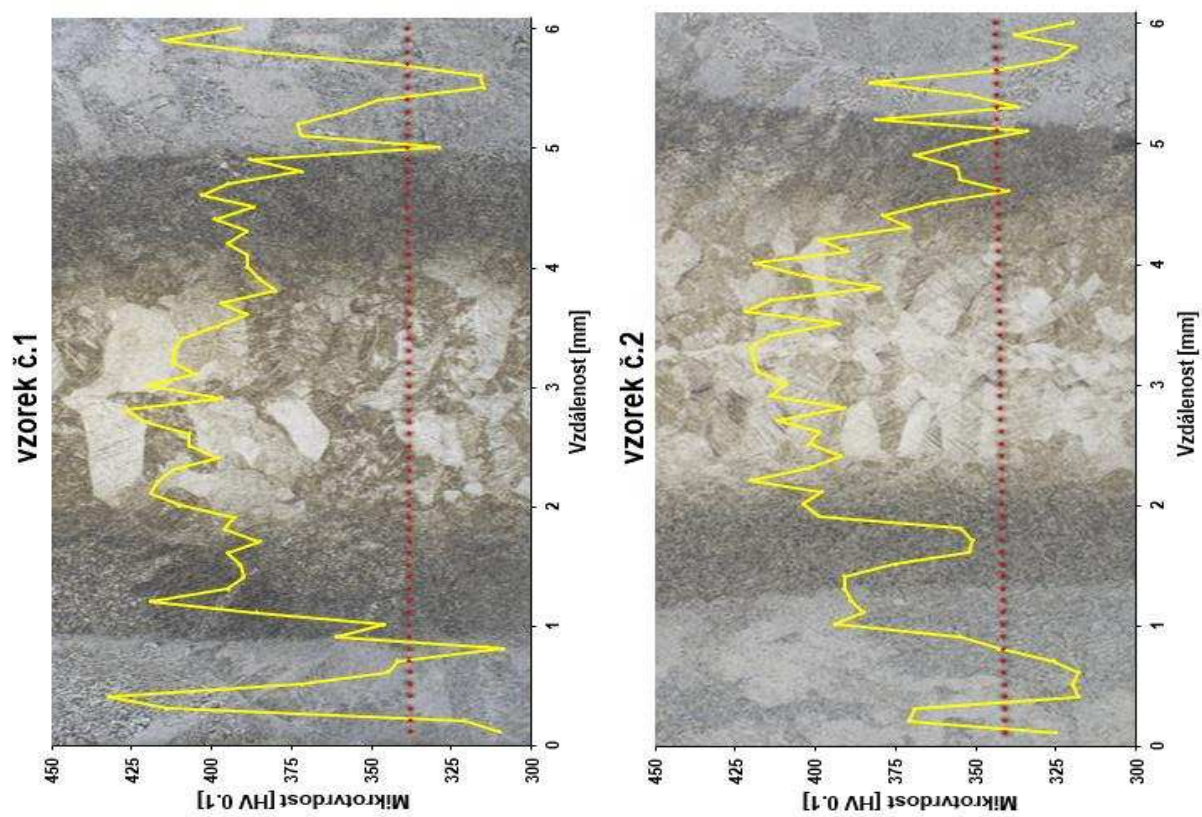
6.5 Profil mikrotvrdosti



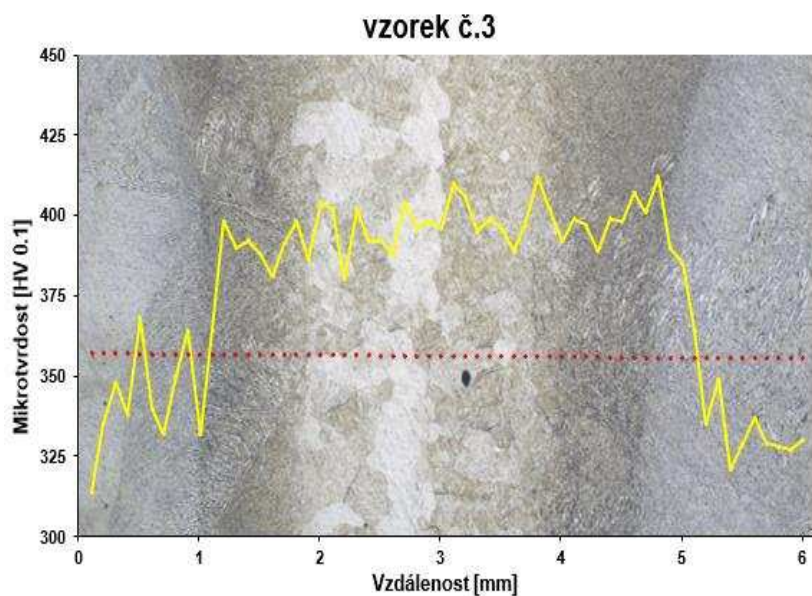
Obrázek 50: Průběh mikrotvrdosti – vzorky 70 a 80



Obrázek 51: Průběh mikrotvrdosti - vzorky 100 a Ti-Ú1



Obrázek 52: Průběh mikrotvrdosti - vzorky č. 1 a č. 2



Obrázek 53: Průběh mikrotvrdości - vzorek č. 3

Na obr. 50 až 53 jsou znázorněny průběhy mikrotvrdości přes některé vyhodnocované svary. Jednotlivé průběhy se od sebe mírně liší. U vzorku 100 (obr. 51 vlevo) a č. 3 (obr. 53) je průběh mikrotvrdości rostoucí přes HAZ od základního materiálu směrem k WM a ve WM je výrazně zvýšená tvrdost oproti základnímu materiálu, přičemž mikrotvrdość základního materiálu se pohybuje okolo 350 HV_{0,1}. U vzorku č. 1 (obr 52 vlevo) došlo ke zvýšení tvrdosti i v oblasti základního materiálu. Tento nárůst tvrdosti může být způsoben částečným vytvrzením precipitací částic TiAl₃ vlivem teplotního cyklu. Obecně však lze konstatovat, že ve WM se mikrotvrdość pohybuje okolo 400 HV_{0,1}, tedy zhruba o 50 HV více, než v základním materiálu.

7. Rozbor výsledků

V experimentální části práce bylo zpracovááno 11 svarových spojů zhotovených EBW, přičemž jednotlivé svary byly svařovány s jinými procesními parametry EB. U první série šesti vzorků (70, 80, 90, 100, 110, 120) se zvyšovalo urychlovací napětí U_A a zároveň úměrně s rostoucím urychlovacím napětím klesal proud svazku I_B tak, aby byl výkon svazku konstantní, tzn., že do všech uvedených vzorků bylo vneseno stejné množství energie. Vyhodnocení makrostruktury těchto vzorků ukázalo, že hloubka průvaru je závislá hlavně na urychlovacím napětí a nikoliv na proudu svazku, protože i při vysoké hodnotě proudu a malém urychlovacím napětí nedošlo k průvaru. U vzorků s urychlovacím napětím 70 a 80 kV docházelo z velké části k neprůvarům a k provaření kořene v celé délce došlo až u svaru s hodnotou urychlovacího napětí 90 kV. Vzhledem ke stejnému množství vnesené energie do všech svarů docházelo u vzorků s neprovařeným kořenem k velmi výraznému rozšiřování hlavy svaru. Obecně z výsledků všech šesti vzorků lze konstatovat, že při konstantním výkonu svazku a měnícím se urychlovacím napětím a proudem svazku bude šířka hlavy nepřímo úměrná šířce kořene.

Vliv rychlosti svařování byl vyhodnocován na třech vzorcích s rychlostmi posuvu 5, 6 a 7,5 mm/s. Při svařování těchto tří vzorků byly všechny procesní parametry kromě rychlosti konstantní. Při zvyšování rychlosti svařování tedy snižujeme množství vnesené energie do materiálu. Při rychlosti svařování 5 mm/s vznikl svar s propadenou hlavou v celé délce, mírně se zužující směrem ke kořenu s výrazným protečením a rozstříky. Při zvýšení rychlosti na 6 mm/s vznikla nesouměrná hlava a došlo k výraznějšímu zúžení kořene než při rychlosti 5 mm/s. U vzorku svařovaného rychlostí 7,5 mm/s došlo k mírnému rozšíření hlavy, která byla souvislá, ale i k velmi výraznému zúžení kořene kde docházelo i k neprůvarům a velkému výskytu dutin. Při nízké rychlosti svařování tedy dochází k propadnutí hlavy a protečení kořene a naopak při příliš vysoké rychlosti vznikají neprůvary a dutiny v kořeni svaru, přičemž k této změně došlo při zvýšení rychlosti z 6 na 7,5 mm/s. Z toho vyplývá, že tvar svaru je v tomto rozmezí velice citlivý na rychlost svařování a pro optimalizaci svarového spoje by bylo vhodnější měnit jiné procesní parametry, např. proud svazku nebo urychlovací napětí, popřípadě zvyšovat/snižovat rychlost po značně menších krocích – např. 0,5 mm/s.

Vliv fokusace svazku byl vyhodnocován na třech svarech s hodnotami fokusace -10, -8 a -6 mA. U svaru zhotoveného při hodnotě fokusace -10 mA vznikla převážně propadená hlava a kořen s výrazným protečením. Při hodnotě fokusace -8 mA vznikl velmi podobný svar jako v předchozím případě, ale při hodnotě fokusace -10 mA docházelo k výraznějším propadům hlavy. U svaru, kde byla použita hodnota fokusace -6 mA, došlo k výraznému rozšíření hlavy a zúžení kořene, ale stále docházelo k propadům hlavy a protečení kořene, což bylo pravděpodobně způsobeno vysokou hodnotou proudu svazku. Z výsledků vyplývá, že posouváním roviny, na kterou je EB fokusován výš, tj. blíže k hlavě svaru, posouváme i rozložení vnesené energie do svaru. Hlava se rozšiřuje vlivem většího množství absorbované energie a kořen se naopak zužuje.

Nastavení procesních parametrů na výslednou mikrostrukturu WM a HAZ neměl v podstatě žádný vliv. Mikrostruktura svarového kovu je čistě martenzitická a patrně převládá hexagonální α' martenzit a v HAZ převládá lamelární struktura s košíkovou morfologií. Mikrostruktura základního materiálu je z většiny tvořena hrubou lamelární strukturou a z části globulární $\alpha+\beta$ strukturou.

Mikrotvrlost základního materiálu se pohybuje okolo 350 HV_{0,1}, přes HAZ roste směrem k WM a uvnitř WM se pohybuje okolo 400 HV_{0,1}, došlo tedy ke zvýšení tvrdosti o 50 HV v důsledku martenzitické přeměny.

8. Závěr

Z titanové slitiny Ti6Al4V byly v rámci řešení projektu MPO č. FV10385 zhotoveny svary pomocí EBW pro různá nastavení procesních parametrů EB. Vyhodnocením poskytnutých vzorků jsme došli k následujícím závěrům.

- Na hloubku průvaru má vliv hlavně urychlovací napětí, nikoliv proud svazku a při konstantním výkonu EB bude šířka hlavy svaru nepřímo úměrná šířce kořene.
- Při pomalém posuvu dochází vlivem velkého množství vnesené energie k propadnutí hlavy a velmi výraznému protečení kořene a rozstříkům. Naopak při vysoké rychlosti svařování začne docházet k neprůvarům a velkému výskytu vad v oblasti kořene svaru.
- Fokusace ovlivňuje rozložení vnesené energie ve svaru. Při fokusaci do větší hloubky pod povrch je vneseno velké množství energie do kořene svaru a dochází k jeho výraznému protečení a propadům hlavy, naproti tomu při fokusaci do menší hloubky pod povrch svařovaného materiálu se výrazně rozšiřuje hlava a zároveň se zužuje kořen svaru.
- Nastavení procesních parametrů má zásadní vliv na makrostrukturu svarového spoje, ale u mikrostruktur jednotlivých WM a HAZ nebyly pozorovány žádné rozdíly.
- Vlivem velmi rychlého ochlazení WM došlo ke zvýšení tvrdosti o 50 HV v důsledku martenzitické přeměny.

9. Seznam literatury

- [1] DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 08-717-0686-5.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 9788026071327.
- [4] Ilmenit. In: Fotoarchiv [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://fotoarchiv.geology.cz/cz/foto/14294/>
- [5] Rutil. In: Mineralienatlas [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?lang=en&language=english&mineral=Rutil>
- [6] KADLEC, Ferdinand. *Výroba neželezných kovů*. Praha: SNTL, 1971.
- [7] WESSEL, James K. Handbook of advanced materials enabling new designs. [Online]. Wiley-Interscience, 2004, 645 s. ISBN 9780471465188.
- [8] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [9] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. Řada hutnické literatury.
- [10] ASKELAND, Donald R. a Pradeep P. FULAY. The science and engineering of materials. 5th ed. Toronto, Ont.: Thomson, c2006. ISBN 05-345-5396-6.
- [11] SAKARI, Tolvanen. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V welds produced with different processes. Technical report no 109/2016. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2016. ISSN 1652-8891.
- [12] STRÁSKÝ, Josef. Titanium and titanium alloys [online]. In: . [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiJ3tfYzZHbAhUHyqQKHTWODBsQFggsMAA&url=https%3A%2F%2Fmaterial.karlov.mff.cuni.cz%2Fpeople%2Fstrasky%2FTitanium_course%2Flecture3.pptx&usg=AOvVaw0bb_r8eRmrf-movoTCqh3I
- [13] LÜTJERING, G., J. C. WILLIAMS a A. GYSLER. MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS. Microstructure and Properties of Materials. River Edge, NJ: World Scientific, 2000, s. 1-77. ISBN 978-981-02-4180-3.
- [14] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 9788022731676.

- [15] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771853.
- [16] WANG, S. a X. WU. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding. *Materials and Design.* 2012, (36), s. 663-670.
- [17] OH, Jinkeun, N. J. KIM, S. LEE a E. W. LEE. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds. *Materials Science and Engineering A.* 2003, (340), s. 232-242.
- [18] SCHULTZ, Helmut. *Electron beam welding.* Cambridge: Woodhead Publishing, 1993. ISBN 1855730502.
- [19] LIENERT, T. J., S. S. BABU, T. A. SIEWERT a V. L. ACOFF. *ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes.* Vol. 6A. Materials Park OH: ASM International, 2011, 920 s.
- [20] ADAM, V., U. CLAUB, D. DOBENECK, T. KRÜSSEL a T. LÖWER. *Electron Beam Welding - The fundamentals of fascinating technology.* Burg: pro-beam AG & Co., 2011, 98 s.
- [21] KRAMÁR, T., L. KOLAŘÍK, P. VONDRUŠKA, K. KOVANDA a J. MÁLEK. Elektronové svařování - perspektivní metoda pro speciální materiály. *MM Průmyslové spektrum.* 2016, (2016/1), s. 96.
- [22] Titanium sponge and powder. Wellmet International [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.wellmetusa.com/titanium.html>
- [23] Titanium industries. Titanium exposed [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.titaniumexposed.com/titanium-industries.html>

10. Seznam použitých zkratk a symbolů

A	tažnost	[%]
BCC	kubická prostorově středěná mřížka (Body Centered Cubic)	
d_p	hloubka penetrace svazku	[μm]
E	Youngův modul pružnosti	[GPa]
EB	elektronový svazek (Electron Beam)	
EBW	svařování elektronovým svazkem (Electron Beam Welding)	
f	oscilační frekvence svazku	[Hz]
HAZ	tepelně ovlivněná oblast (Heat Affected Zone)	
HCP	šesterečná těsně uspořádaná mřížka (Hexagonal Close Packed)	
I_B	proud svazku	[mA]
m_e	klidová hmotnost elektronu	[g]
P_B	výkon svazku	[W]
q_e	náboj elektronu	[C]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
SURF	zaostření svazku	[mA]
T_t	teplota tání	[°C]
T_v	teplota varu	[°C]
TZ	tepelné zpracování	
U_A	urychlovací napětí	[kV]
v	rychlost svařování	[mm/s]
v_e	rychlost elektronů	[mm/s]
WM	svarový kov (Weld Metal)	
α	nízkoteplotní fáze Ti slitin	
α'	hexagonální martenzit	
α''	orthorombický martenzit	
α_P	primární α fáze	
β	vysokoteplotní fáze Ti slitin	
ρ	hustota	[kg/m ³]
\varnothing_{spot}	fokusace svazku	[mm ²]

11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv teploty na měrnou mez kluzu různých slitin [2]	10
Obrázek 2: Krystalografická struktura titanu [7]	11
Obrázek 3: Titanové rudy ilmenit a rutil [4, 5]	12
Obrázek 4: Titanová houba [22].....	13
Obrázek 5: Krollův proces [23].....	14
Obrázek 6: Vliv přísadových prvků na teplotu fázové přeměny [2]	15
Obrázek 7: Důležité procesní parametry, výsledná mikrostruktura a její vliv na mechanické vlastnosti pro dvoufázovou mikrostrukturu [13].....	17
Obrázek 8: Průběh tvrdosti [17]	18
Obrázek 9: Mikrostruktura Ti64: a - základní materiál, b - svar zhotovený metodou TIG, c - svar zhotovený EB [17].....	19
Obrázek 10: Vznik keyhole [18]	21
Obrázek 11: Interakce EB s kovem a proudění taveniny při průchodu keyhole materiálem [21]	21
Obrázek 12: Zařízení pro EBW [21]	22
Obrázek 13: Vliv velikosti proudu svazku na vzhled svaru [18]	23
Obrázek 14: Vliv oscilace na rozložení legujících prvků: a) kruhová, b) lineární [16]	24
Obrázek 15: Roviny řezů ve vzorcích	26
Obrázek 16: Graf závislosti šířky svaru na U_A	27
Obrázek 17: Vzorek 70.1 (16x).....	28
Obrázek 18: Vzorek 70.3 (20x).....	28
Obrázek 19: Vzorek 70.4 kořen (16x a 50x); snímky jsou zrcadlově převráceny	28
Obrázek 20: Vzorek 80.1 (16x a 20x)	29
Obrázek 21: Vzorek 80.2 (16x a 20x)	29
Obrázek 22: Vzorky 80.3 a 80.2 (50x a 100x)	29
Obrázek 23: Vzorek 90.1 (12,5x a 16x)	30
Obrázek 24: Vzorek 90.2 (16x).....	30
Obrázek 25: Vzorky 90.3 a 90.4 (50x).....	30
Obrázek 26: Vzorek 100.1 (16x a 20x)	31
Obrázek 27: Vzorek 100.2 (12,5x a 50x)	31
Obrázek 28: Vzorek 110.1 (20x).....	32
Obrázek 29: Vzorek 110.2 (16x a 20x)	32
Obrázek 30: Vzorek 110.4 (16x a 50x)	32
Obrázek 31: Vzorek 120.1 (20x).....	33
Obrázek 32: Vzorek 120.2 (20x).....	33
Obrázek 33: Vzorek 120.3 (20x).....	33
Obrázek 34:Graf závislosti šířky svaru na množství vnesené energie	34
Obrázek 35: Vzorek č. 1.1 (16x)	35
Obrázek 36:Vzorek č. 1.2 (16x).....	35
Obrázek 37: Vzorek č. 2.1 (16x a 20x)	36
Obrázek 38: Vzorek č. 2.3 (16x a 25x)	36
Obrázek 39: Vzorek č. 2.2 (50x a 200x)	36
Obrázek 40: Vzorek č. 3.4 (16x).....	37
Obrázek 41: Vzorek č. 3.2 (16x).....	37
Obrázek 42: Graf závislosti šířky svaru na fokusaci.....	38

Obrázek 43: Vzorek Ti-S3.1 (16x).....	39
Obrázek 44: Vzorek Ti-S3.3 (16x).....	39
Obrázek 45: Vzorek Ti-Ú1.1 (12,5x a 16x)	40
Obrázek 46: Vzorek Ti-Ú1.4 (12,5x a 16x)	40
Obrázek 47: Vzorek 90.2 základní materiál (200x a 500x)	41
Obrázek 48: Vzorek 90.2 WM (200x a 500x).....	41
Obrázek 49: Vzorek 90.2 HAZ (100x a 200x).....	42
Obrázek 50: Průběh mikrotvrdosti – vzorky 70 a 80	42
Obrázek 51: Průběh mikrotvrdosti - vzorky 100 a Ti-Ú1	43
Obrázek 52: Průběh mikrotvrdosti - vzorky č. 1 a č. 2	43
Obrázek 53: Průběh mikrotvrdosti - vzorek č. 3	44

12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vlastností titanu [2, 3]	11
Tabulka 2: Penetrační hloubka EB (v μm) pro různé typy materiálu v závislosti na U_A [20]	23
Tabulka 3: Chemické složení (hm. %)	25
Tabulka 4: Hodnoty procesních parametrů	25
Tabulka 5: Kroll I.	26